

目 录

第一章 绪 论	(1)
一、遥感地质学的性质、研究对象、内容及方法	(1)
二、遥感技术系统与技术特点	(1)
三、遥感科学和遥感地质学的发展历史与发展前景	(2)
第二章 遥感物理基础	(4)
第一节 电磁波的基本特征	(4)
一、电磁辐射的基本特征	(4)
二、电磁波谱	(5)
第二节 电磁辐射源	(7)
一、电磁辐射度量与单位	(7)
二、物体的热辐射	(7)
三、太阳辐射和大地辐射	(10)
第三节 地球大气对电磁辐射传输的影响	(11)
一、大气散射	(12)
二、大气吸收	(12)
三、大气反射	(12)
四、大气窗口与遥感波谱通道	(13)
第四节 地物波谱特征	(14)
一、地物波谱曲线与波谱分析	(14)
二、反射波谱和发射波谱	(14)
三、水体的波谱特征	(15)
四、植被的波谱特征	(15)
五、岩石的波谱特征	(16)
六、土壤的波谱特征	(18)
七、城市地物的波谱特征	(18)
八、地物波谱的时间效应和空间效应	(19)
第五节 色度学	(19)
一、彩色三要素	(19)
二、三基色原理	(20)
三、多光谱摄影	(20)
四、色度图	(21)
第三章 遥感图像类型与特性	(23)
第一节 成像遥感技术系统	(23)
一、遥感平台	(23)
二、传感器	(26)
三、遥感地面接收站	(33)
四、遥感信息的传输	(34)

五、遥感图像的种类	(34)
六、遥感图像的基本属性	(35)
第二节 光学摄影像片特性	(37)
一、帧幅式摄影像片特性	(37)
二、全景式摄影像片特性	(41)
第三节 光机扫描图像特性	(42)
一、光机扫描图像的空间特性	(42)
二、光机扫描图像的波谱特性	(47)
第四节 固体自扫描图像特性	(52)
一、HRV成像特点	(52)
二、HRV图像特性	(53)
第五节 成像雷达图像特性	(54)
一、成像雷达图像的空间特性	(54)
二、成像雷达图像色调的影响因素	(56)
第四章 遥感图像处理	(60)
第一节 光学图像处理	(60)
一、光学等密度分割处理	(60)
二、光学彩色合成处理	(62)
三、其他光学图像处理	(64)
四、光学变换处理简介	(65)
第二节 数字图像处理	(66)
一、数字图像处理的基本概念	(66)
二、图像恢复处理	(69)
三、图像增强处理	(72)
四、图像分类处理简介	(81)
第五章 地质解译标志与遥感图像地学分析方法	(84)
第一节 地质解译的目标与要求	(84)
一、解译的涵义	(84)
二、地质解译的目的与要求	(84)
第二节 地质解译标志	(84)
一、图像的色调与色彩	(84)
二、地物的几何形态	(85)
三、阴影	(86)
四、水系类型和水系分析	(86)
五、影纹图案	(89)
六、其他地质解译标志	(90)
第三节 遥感地学分析方法简介	(90)
第六章 遥感图像地貌解译及其应用	(93)
第一节 概述	(93)
第二节 流水地貌解译	(93)
一、侵蚀沟及洪积扇的图像特征	(93)

二、河流地貌的图像特征·····	(94)
三、河流三角洲的图像特征·····	(95)
第三节 岩溶地貌解译·····	(95)
第四节 沙丘地貌与黄土地貌解译·····	(96)
一、沙丘地貌的图像特征·····	(96)
二、黄土地貌的图像特征·····	(96)
第五节 海岸地貌解译·····	(97)
第六节 重力地貌解译·····	(97)
一、崩塌·····	(97)
二、滑坡·····	(98)
三、泥石流·····	(98)
第七节 冰川地貌解译·····	(99)
第八节 构造地貌解译·····	(99)
一、山体构造地貌解译·····	(99)
二、坡面构造的解译·····	(100)
三、构造盆地解译·····	(100)
第七章 遥感岩性解译与编图·····	(101)
第一节 岩浆岩的解译·····	(101)
一、中酸性岩体解译·····	(101)
二、基性、超基性岩解译·····	(103)
三、脉岩解译·····	(104)
四、火山岩类解译·····	(104)
第二节 沉积岩与松散沉积物解译·····	(105)
一、沉积岩基本解译标志·····	(105)
二、主要沉积岩解译特征·····	(106)
三、松散沉积物解译·····	(109)
第三节 变质岩解译·····	(110)
一、区域变质岩解译·····	(110)
二、其它变质岩解译·····	(111)
第四节 岩性识别方法与解译要领·····	(111)
一、岩性解译特点·····	(111)
二、岩性解译要领·····	(111)
三、岩性识别的主要方法·····	(115)
第五节 遥感地层分析与岩性制图·····	(118)
一、地层角度不整合接触关系的解译·····	(118)
二、岩相变化的遥感分析·····	(119)
三、遥感地质图件的编(测)制·····	(119)
第八章 遥感构造解译与编图·····	(122)
第一节 岩层产状解译·····	(122)
一、不同产状的岩层图像特征·····	(122)
二、岩层产状的测定方法·····	(123)

第二节 褶皱构造解译	(126)
一、褶皱构造的解译标志	(126)
二、褶皱构造地质特征的遥感分析	(127)
第三节 断裂与线性构造解译	(130)
一、遥感图像上的断裂与线性构造	(130)
二、断裂、线性构造的解译标志	(131)
三、断裂构造地质特征的遥感分析	(133)
四、断裂、线性构造解译资料的分析方法	(137)
第四节 环状构造解译	(140)
一、环状影像与环状构造	(140)
二、环状构造的影像特征	(140)
第五节 隐伏构造与活动构造的解译	(141)
一、隐伏构造的解译	(141)
二、活动构造解译	(144)
第六节 遥感构造编图	(146)
一、遥感构造编图的精度	(146)
二、遥感构造图的种类	(146)
三、解译构造剖面的编制	(146)
第九章 多波谱遥感资料在矿产资源勘查中的应用	(147)
第一节 遥感找矿标志	(147)
一、采矿、冶炼遗迹	(147)
二、含矿体的影像特征	(148)
三、围岩蚀变	(148)
四、油气渗漏的遥感检测及机理	(148)
五、植物的变异现象	(149)
第二节 不同岩区成矿条件遥感研究	(150)
一、岩浆岩区矿床	(151)
二、变质岩区矿床	(151)
三、沉积岩区矿床	(152)
四、表壳矿床	(152)
第三节 遥感资料综合分析用于找矿	(153)
一、线性构造及与成矿的关系	(153)
二、环形构造影像及与成矿的关系	(154)
三、多波谱遥感资料的矿化蚀变信息提取	(155)
第十章 多时相遥感资料地学动态分析	(159)
第一节 遥感地学动态分析的方法原理	(159)
一、遥感地学动态信息的类型	(159)
二、遥感地学动态分析的内容和工作程序	(160)
第二节 多时相遥感资料地学动态分析的应用实例简介	(162)
一、近期黄河口冲淤动态监测	(163)
二、岳阳市城市扩展动态检测	(164)

三、气象卫星热红外图像的地震监测应用·····	(165)
第十一章 多源地学信息复合资料的地质应用 ·····	(166)
第一节 多源地学信息的复合处理·····	(166)
一、多源地学信息复合的涵义、目的与内容·····	(166)
二、多源地学信息复合处理工作步骤·····	(166)
第二节 多源地学信息资料在区域地质研究中的应用·····	(168)
一、作基础影像资料·····	(168)
二、应用于区域地质综合分析与编图·····	(168)
第三节 多源地学信息资料在矿产资源勘查中的应用·····	(176)
一、在多金属、金矿勘查中的应用·····	(176)
二、在能源矿产勘查中的应用·····	(179)
三、从多源地学信息中提取找矿的基本信息·····	(182)
第十二章 遥感资料在其他地学领域的应用概述 ·····	(185)
第一节 遥感资料在环境、水文、工程地质工作中的应用·····	(185)
一、地质灾害的遥感监测与研究·····	(185)
二、区域环境地质监测与评价·····	(185)
三、工程地质与水文地质遥感·····	(186)
第二节 遥感技术在国土资源调查及城市规划工作中的应用·····	(188)
一、太原幅农业自然条件目视解译系列图·····	(188)
二、遥感在内蒙古草场调查中的应用研究·····	(188)
三、城市遥感工作中的应用·····	(189)
第三节 遥感技术在土壤、植被、旅游资源与考古工作中的应用·····	(189)
一、植被、土壤方面的遥感应用·····	(189)
二、在旅游资源调查和考古工作中的应用·····	(190)
第四节 天体遥感的地质研究·····	(191)
第十三章 地理信息系统及其应用 ·····	(192)
第一节 地理信息系统的概念与系统构成·····	(192)
一、概念·····	(192)
二、系统构成·····	(192)
第二节 GIS在地质学中的应用·····	(194)
主要参考文献 ·····	(197)
图版说明及图版 ·····	(201)

第一章 绪 论

一、遥感地质学的性质、研究对象、内容及方法

对遥感一词涵义有广义和狭义两种理解。地学遥感常用的是狭义的遥感,它是指从远距离、高空以至外层空间的平台上,利用可见光、红外、微波等探测仪器,通过摄影或扫描方式,对电磁波辐射能量的感应、传输和处理,从而识别地面物体的性质和运动状态的现代化技术系统。遥感按电磁辐射源的性质不同分为主动遥感和被动遥感两种基本方式,前者如雷达,使用人工电磁辐射源;后者如摄影,使用太阳等自然辐射源。

遥感地质学作为遥感技术与地球科学结合的一门新学科,其理论是建立在物理学的电磁辐射与地质体相互作用的机理基础之上的;而技术方法则是建立在“多”技术基础之上的。正是通过多波(光)谱、多平台、多时相、多向成像、多向极化、多级增强处理等技术手段来收集与分析遥感数据资料,才能获得比60年代以前单靠航空摄影所取得更多的波谱的、空间的、时间的地学信息。

遥感地质学作为一门边缘学科,其研究对象是地球表面和表层地质体(如岩石、断裂)、地质现象(如火山喷发)的电磁辐射的各种特性。研究的目的是为了有效识别地质体的物性与运动状态,在此基础上,为地质构造研究、矿产资源勘查、区域地质调查、环境和灾害地质监测等工作服务。

遥感地质学的研究内容主要有:①各类地质体的电磁辐射(反射、吸收、发射等)特性及其测试、分析与应用;②遥感数据资料的地学信息提取原理与方法;③遥感图像的地质解译与编图;④遥感技术在地质各个领域的具体应用和实效评估。

遥感地质学使用的方法,涉及地物波谱测试方法、数理统计相关分析的方法、模拟试验的方法、模式识别与视觉效应的方法,以及地学(地质、地理、地貌、地图学)的有关研究分析方法等。

二、遥感技术系统与技术特点

遥感技术系统包括遥(传)感器和运载工具、信息的接收与预处理及分析解译系统三个部分。第一部分主要是遥感仪器及其运载工具——遥感平台的介绍(见第二章中介绍);第二部分包括遥感信息的接收、记录、预处理及储存,主要是地面接收站的工作与设备,与教学关系不大,故从略;第三部分涉及图像处理及解译分析和应用,是教材主要阐述的内容。

遥感的技術特点是:

(1)视域宽广。居高俯视,单幅图像覆盖面积很大(一幅TM为34385km²),便于进行地学大区域宏观观察与分析对比。

(2)信息丰富。包括可见光、红外、微波多波段遥感,能提供超出人视觉以外的大量地学信息。

(3) 定时、定位观测。能周期性监测地面同一目标地质体, 有利于对比分析其特点, 并可以对某些地质现象(如火山喷发、洪水过程)作动态分析。

(4) 遥感资料的计算机处理技术的广泛应用, 使多种地学资料的综合分析, 地学信息提取, 地学数据库的建立有了技术上的保障。

这些技术特点和优点, 对地学非常有用, 因而在短短20年时间内, 遥感技术在我国农、林、交通、气象等许多部门都得到很大发展, 在地质科学的许多部门(如找矿、区域地质制图、水文、工程和环境地质等)也同样得到长足进展。

三、遥感科学和遥感地质学的发展历史与发展前景

(一) 遥感科学发展的几个阶段

遥感科学是从航空摄影测量逐步演变发展起来的, 是通过一些高科技军事侦察技术的解密和转向民用而成长起来的。遥感科学的发展历史通常分为: 第二次世界大战前的早期阶段, 此阶段实际上是航空摄影阶段; 1937—1960年的中期阶段, 其标志是成像技术从航空摄影发展到电视、扫描、雷达等多种方法, 成像取得的资料应用从军事侦察及民用摄影测量推广到民用各个行业; 第三阶段即60年代以后, 可以用下列几点表明遥感技术已摆脱单一航空摄影成像, 发展成为遥感科学。其标志是: ①民用航天技术出现, 尤其是美国地球资源技术卫星(ERTS)的发射成功, 标志着民用航天遥感阶段的开始, 使遥感的定时、定位观测与对比解译, 在技术上成为可能, 经济上变得合算, 并使人类对地球的观测从高空扩展到外层空间; ②新型遥感器技术的应用使电磁波谱从可见光摄影扩展到红外、微波波段, 延伸了人的感官, 扩大了信息源; ③大型电子计算机的开发和使用, 为遥感图像处理技术奠定了基础, 使从遥感获得的大量数据资料得以及时处理并提供给用户, 使得民用遥感技术走向实用化和商业化。

(二) 遥感地质的发展前景

遥感地质学作为遥感的一个组成部分, 将随遥感技术的发展而不断前进。其发展前景主要表现在以下四个方面:

1. 新的遥感波段开发与遥感器的研制。前者如毫米波段、激光雷达和紫外波段的开发利用。后者主要对可见光, 尤其红外波段的高分辨力、窄波段的遥感器的研制。当然还有作为遥感器的运载工具的各种平台的研究(如航天飞机和地质专用卫星等), 以及遥感数据资料的实时传输等。

2. 快速、省廉、有效的地学信息处理、提取、分析方法, 如地理信息系统、专家系统以及新的图像增强处理方案的开发等。

3. 遥感技术在地质学已开展的领域的深化和新领域的开拓。现有应用领域的深化首先是在矿产资源勘查中的遥感技术应用方面, 向模式化、自动化和定量化方向发展; 其次是在区域构造分析, 遥感地质编制图件上的应用。在遥感技术地学应用新领域的开拓方面, 深部构造的遥感分析, 包括灾害地质、城市地质等在内的(广义的)环境地质遥感是主要内容。

4. 遥感地学机理的研究。例如遥感地学信息的传输问题, 以及一些巨大环状构造的形成机理就是一个有待深入的问题。

遥感地质学作为一门新的地学分支, 尽管它在理论上、技术上、应用上还不是十分成

熟，人们对它的认识和评价还有不同，甚至它的有关名词、术语的概念、译名都有待统一，但它的技术长处和它在地质学中所起的作用，是其它地学学科所无法取代的。在即将来临的21世纪，遥感技术与遥感地质，一定会在我国地学工作中发挥更大作用，显示技术优势，作出更多的贡献。

第二章 遥感物理基础

第一节 电磁波的基本特征

电磁波是在空间传播的交变电磁场。这些电场和磁场以光速传播并且彼此垂直，同时还与传播方向垂直。无线电波、微波、红外线、可见光、紫外光、X射线、Y射线都是电磁波，不过它们产生的方式不同，波长也不同。电磁波理论是遥感的物理基础，因此了解电磁波的一些基本特征，是学习遥感地质学的基础。

一、电磁辐射的基本特征

电磁辐射在遥感中常指电磁波，实际上是电磁波通过空间或媒质传递能量的物理现象，即电磁能量以波的形式发射的过程。它具有下列特征：

（一）电磁波的传播

电磁波的传播是能量存在的一种形式，在传播过程中，其波长（或频率）、强度、传播方向和偏振面会发生变化，如反射、折射、吸收、散射、偏振等。波长、强度、传播方向、偏振面是描述电磁波的四个基本物理量。

电磁波所以能够传递信息是与上述四个基本参量密切相关的。例如在可见光范围，由于波长或频率的不同，给人们以各种颜色的信息；电磁辐射源与目标之间的相对运动会产生频率移动的多普勒效应，利用此效应可获得目标速度的信息。根据电磁波的传播方向、振幅和极化面的变化，可获得有关目标的位置、形状（包括方位、距离、图像）等信息。

（二）电磁波的叠加和相干

当振动方向和振动频率均不同的多列电磁波在空间相遇时，相遇点的复合振动等于各列波在该点的矢量和，而在其它位置每一列波仍保持原有的特征（振动方向、频率等保持不变），因此，波的传播是独立的，这就是叠加原理。电磁波的叠加原理适合于大多数常见介质中传播的电磁波。

两列频率、振动方向、相位都相同或相位差恒定的电磁波叠加时，某些部位处于振动永远加强，而另一些部位则处于振动永远减弱或完全抵消的现象，称为电磁波的相干。对于相干辐射，探测器在某一位置可能接收到较多的能量，而在另一位置可能接收到较少的能量；对于非相干辐射，探测器接收的平均能量等于每列波单独投射时的平均能量之和，且不受探测器位置变化的影响。相干作用的结果使影像产生颗粒状或斑点，影响人们对图像的解译。

（三）电磁波的衍射

如果电磁波投射在一个它不能透过的有限大小的障碍物上，将会有一部分波从障碍物的边界外通过，这部分波在超越障碍物时，会改变方向绕过其边缘而达到障碍物后面的阴影区。电磁波通过障碍物边缘所引起的这种使一些辐射量发生方向改变的现象称为电磁波

的衍射。在遥感测量中不得不考虑电磁波衍射效应的影响。例如，在微波遥感中当电磁波到达遥感天线时，被天线孔径切割或截获时要发生衍射，使接收效果受到影响。

（四）电磁波的偏振（极化）

电磁波是交变电磁场在空间的传播，在传播过程中，电场强度、磁场强度和传播方向三者之间始终保持垂直。通常电场强度在各个方向（垂直于传播方向的平面上）是相等的，若其总是固定在某个方向振动，则称电磁波在该方向被极化（偏振）。依电场强度与入射面（通常是地表面）的关系分为水平极化（H）和垂直极化（V），水平极化两者互相垂直，垂直极化两者互相平行。电磁波的极化现象在微波遥感技术中有很重要的意义，是影响微波图像灰度的一个重要因素。

利用平面偏振以及它在各种物质表面的反射、透射特性，我们就能预计相应的回波强度；反之，根据回波强度，我们也可以判断物体的特性，这就是偏振波在遥感中的意义所在。例如，用微波辐射计测量1.41 GHz、8.36GHz、19.34GHz三个频率上的海面亮度温度时发现，当入射角为55°时，海面风速对垂直极化的亮度温度没有贡献，而水平极化的亮度温度却随风速增加而增加。在19.34 GHz，风速每增加1m/s，水平极化的亮度温度增加约1.1K。

（五）电磁波的多普勒效应

当一个频率为 f 的电磁辐射源向着观察者运动或者背着观察者运动时，则观察者从这个源所接收到的辐射将具有另一个频率 f' 。如果这个辐射源向观察者运动时， f' 大于 f ；如果背离观察者运动时，则 f' 小于 f 。由观察者和辐射源的相对运动所引起的电磁辐射的频率改变，就叫多普勒效应。

电磁波的多普勒效应在民用遥感技术上的应用还很少见有公开报导。

（六）电磁波的波粒二象性

电磁波具有波动性和粒子性两方面特征，即具有波粒二象性。波动性就是它的时空周期性，可以用波长、速度、周期和频率来表征，它主要表现为电磁波有干涉、衍射、偏振、散射等现象。粒子性是指电磁波是由密集的光子微粒流组成的，电磁波实质上是光子微粒流的有规律的运动，主要表现为电磁辐射的光电效应、康普顿效应等。用统计的观点把波和粒子的二象性联系到一起，波是粒子流的统计平均，而粒子是波的量子化。

不同波长的电磁波，其波动性和粒子性表现的度不一样，较短波长的电磁波主要表现出粒子性，波长越短，粒子性表现愈明显；而长波电磁波则主要表现出波动性。

二、电磁波谱

不同的辐射源产生的电磁波的波长各不相同，其变化范围也很大。将各种电磁波按其波长（或频率）的大小，依次排列成图表（图2-1），这个图表就叫电磁波谱。

在电磁波谱中，各个波段的划分是相对的，它们之间并没有明显的界限，实际上从宇宙射线到工业电波，整个电磁波谱都是连续的。各谱段的电磁波，由于其波长范围不同，它们的性质就不同，探测记录它们的方法也不相同。目前遥感技术应用的波谱段，主要是从紫外到微波的范围。各谱段的波长范围的划分在不同文献上略有差异，本书采用如下的划分：

紫外波段 0.01—0.38 μm

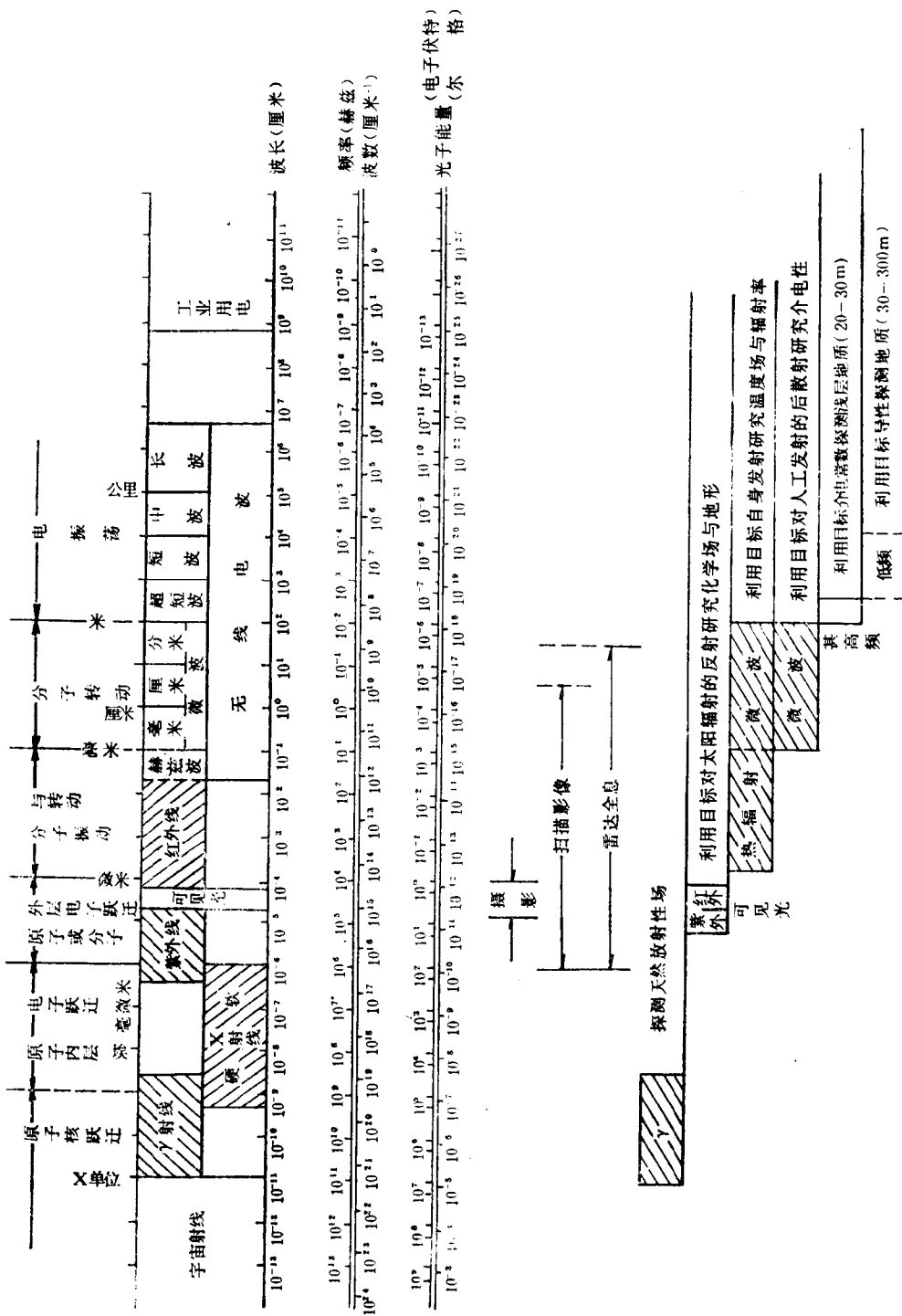


图 2-1 电磁波谱及其应用

(据马尧乃, 1984)

可见光波段 $0.38-0.76\mu\text{m}$
 紫色光 $0.38-0.43\mu\text{m}$
 蓝色光 $0.43-0.47\mu\text{m}$
 青色光 $0.47-0.50\mu\text{m}$
 绿色光 $0.50-0.56\mu\text{m}$
 黄色光 $0.56-0.59\mu\text{m}$
 橙色光 $0.59-0.62\mu\text{m}$
 红色光 $0.62-0.76\mu\text{m}$
 红外波段 $0.76-1000\mu\text{m}$
 近红外波段 $0.76-3.0\mu\text{m}$
 中红外波段 $3.0-6.0\mu\text{m}$
 热红外波段 $6.0-15.0\mu\text{m}$
 远红外波段 $15.0-1000\mu\text{m}$
 微波波段 $1\text{mm}-1\text{m}$
 毫米波 $1-10\text{mm}$
 厘米波 $1-10\text{cm}$
 分米波 $0.1-1\text{m}$

第二节 电磁辐射源

一、电磁辐射度量与单位

遥感探测实际就是测定辐射量。对可见光波段的辐射量测定是光度测量。对红外到无线电波段的辐射量测定是辐射测量。有时所测定的是同一个量，但使用的术语却不同。表2-1是辐射测量和光度测量的术语对照表。如果在各物理量的前面加上“分光”这个词时，就是指某一波长范围的物理量，如有分光辐射通量、分光辐射亮度等术语。

表 2-1 辐射测量和光度测量术语对照表

辐 射 测 量			光 度 测 量		
名 称	符 号	单 位	名 称	符 号	单 位
辐 射 能	Q_e	焦耳	光 量	Q	流明·秒
辐射通量	ϕ_e	瓦	光通量	ϕ	流明
辐射强度	I_e	瓦·球面度 ⁻¹	光强度	I	坎德拉
辐射散射度	M_e	瓦·米 ⁻²	光通量散射度	M	流明·米 ⁻²
辐射照度	E_e	瓦·米 ⁻²	照 度	E	勒克斯(流明·米 ⁻²)
辐射亮度	L_e	瓦·米 ⁻² ·球面度 ⁻¹	亮 度	L	坎德拉·米 ⁻²

二、物体的热辐射

(一) 绝对黑体及其辐射定律

任何温度高于绝对零度 ($0\text{K} = -273.16^\circ\text{C}$) 的物体都存在着分子热运动，并能产生中、远红外的电磁辐射。这种由物体内部粒子的热运动所引起的电磁辐射叫做热辐射。

大量事实证明,处于不同温度的物体,发出的电磁辐射的强弱及其按波长的分布是不同的。因此用温度作为热辐射能量的绝对度量是一种很方便的方法。

为了便于讨论物体的热辐射性质,需要有一个理想的标准热辐射体作为参照源,这就是绝对黑体。绝对黑体的定义为:在任何温度下,对任何波长的入射辐射的吸收系数(率) $\alpha(\lambda, T)$ 恒等于1,即 $\alpha(\lambda, T) = 1$ 的物体称为绝对黑体,简称黑体。显然,黑体的反射率 $\rho = 0$,透射率 $c = 0$ 。

黑体是一种具有最大辐射能力的物体。一般物体的辐射都比黑体辐射小,因此,以黑体为基准所表达的就是发射率,又叫比辐射率,它的定义是目标物体的辐射量与同温度下的黑体辐射量之比,常用 ϵ 表示。分光发射率是指特定波长下每单位波长宽度的辐射量之比。

1860年,基尔霍夫在实验中发现:在同一温度下,任何物体发射某一波长电磁波的能力,与它对该波长电磁波的吸收能力成正比。黑体吸收电磁波的能力最强,因而它发射电磁波的能力也最强。

1900年,普朗克用量子论概念推导出热辐射定理,其解析式为:

$$M(\lambda, T) = 2\pi hc^2 \lambda^{-5} [\exp(hc/\lambda kT) - 1]^{-1} \quad (2-1)$$

式中, c 为真空中的光速; h 为普朗克常数,其值为 6.626×10^{-34} 焦耳·秒; k 是玻耳兹曼常数,数值为 1.3806×10^{-23} 焦耳/开。

由普朗克公式与实验求出的各种温度下的黑体辐射波谱曲线(图2-2)能够很好符合。从图中可直观地看出黑体辐射的三个特性:①与曲线下的面积成正比的总辐射通量密度是随温度下的增加而迅速增加的。从零到无穷大的波长范围内,对普朗克公式进行积分,得到从单位面积的黑体辐射到半球空间里的总辐射通量表达式为:

$$M(\lambda, T) = \frac{2\pi^5 k^4}{15c^2 h^3} T^4 = \sigma T^4 \quad (2-2)$$

式中, $\sigma = \frac{2\pi^5 k^4}{15c^2 h^3} = 5.67 \times 10^{-8}$ 瓦/米²·开⁴,称为斯蒂芬-玻尔兹曼常数。由此可见,黑体辐射通量密度的增加与绝对温度的四次方成正比,称为斯蒂芬-玻尔兹曼定律。②分光辐射通量密度的峰值波长 λ_{\max} 随温度的增加向短波方向移动,称为维恩位移定律。图2-2中的虚线就是这些峰值的迹线。③每条曲线彼此不相交,故温度越高,所有波长上的波谱辐射通量密度也越大,即随 T 的增加而增大。

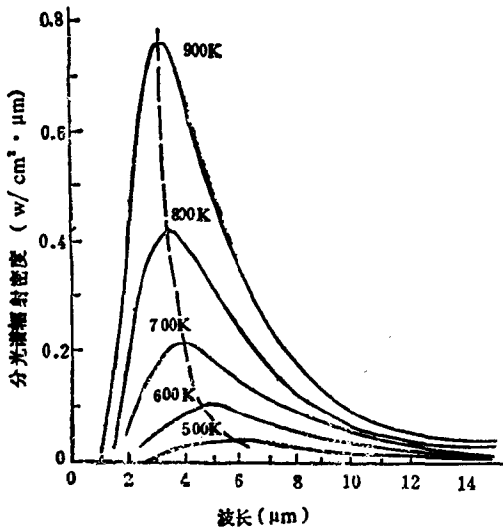


图 2-2 各种温度下的黑体波谱曲线

物体按其发射辐射特性一般分为三种类型:第一种是黑体,它的发射辐射最大(发射率为1),发射率与波长无关。第二种是灰体,其发射率与波长无关(图2-3),但它的发射辐射比黑体小。例如土壤在20℃时发射率为0.92—0.95,水在同样温度下的发射率为0.96,它们都是与黑体颇为接近的灰体。第

三种是选择性辐射体,其发射率随波长而改变,这是原子和分子的辐射吸收效果都比较强的物体,例如水银灯和氙灯等。

黑体、灰体和选择性辐射体的辐射通量密度按波长分布的波谱是不相同的。应该指出的是,黑体并不一定是黑色的,灰体也不一定是灰色。例如,大理石在可见光下呈白色,但它在8—14 μm 的红外波段发射率为0.95,几乎是黑体。

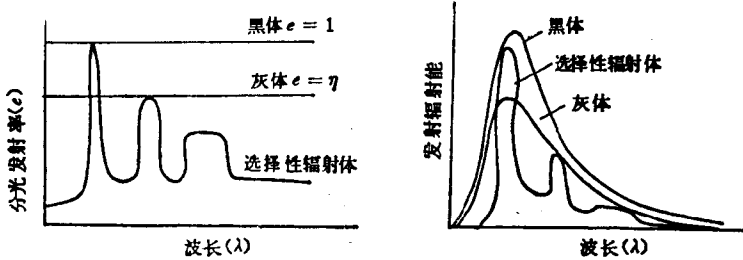


图 2-3 物体发射辐射的三种类型

(二) 物体的热惯量

热惯量(P)是物体对环境温度变化的热反应灵敏性的一种量度,热惯量越大,对环境温度变化的热反应越迟钝。它是描述物体热特性的一个宏观物理量。与物体的密度及热学参量的关系如下:

$$P = (k \cdot \rho \cdot c)^{1/2} \quad (2-3)$$

单位为焦尔/厘米²·秒^{1/2}·度。式中 k 为热扩散系数,单位为厘米²/秒,表示物体内部温度变化的速率。 ρ 为密度,单位为克/厘米³。 c 为比热,单位为焦尔/克·度。

由牛顿冷却定律及热传导方程可以证明,当物体吸收或损失的热能相同时,它们的温度变化幅度与热惯量的大小成反比。热惯量大的物体温度变化的幅度小,热惯量小的物体温度变化的幅度则大。表7-6给出部分岩石和水的热参量值。

图2-4示出白云岩、灰岩和花岗岩在一个太阳日周期内的温度变化曲线。据表7-6给出的热惯量值,三种岩石的热惯量的大小顺序为: $P_{\text{白云岩}} > P_{\text{灰岩}} > P_{\text{花岗岩}}$ 。因而,三种岩石在一个太阳日周期内的温度变化幅度有明显差别,昼夜最大温差的顺序为: $\Delta T_{\text{白云岩}} < \Delta T_{\text{灰岩}} < \Delta T_{\text{花岗岩}}$ 。一幅地表热红外遥感图像基本上就是一幅地物的辐射温度分布图。

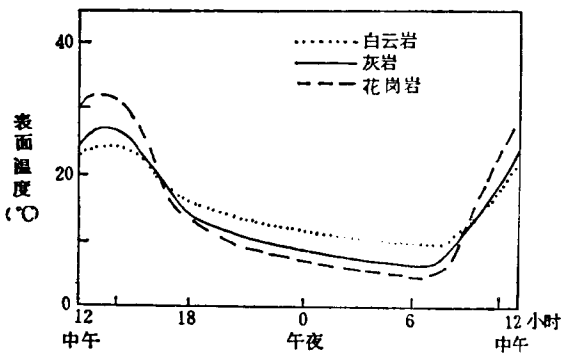


图 2-4 三种不同热惯量岩石的温度日变化曲线
(据 Sabins F.F, 1978)

热红外遥感的最佳探测时间是在黎明前后和中午。其中,黎明前后的热红外图像反映出各种物体的热特性,热惯量大的物体在图像中显示出“暖”特征,热惯量小的物体则显示出“冷”特征;中午的图像反映出地物的反射特征,并且显示出地形特征,用此两种图像的信息特征,可以达到鉴别、区分地物的目的。

热红外遥感已广泛用于环境监测,例如监测火山活动、森林火灾、地下煤自燃及江河、湖、海的污染以及资源调查等。例如,

寻找水源、地质填图、探查地热、铀矿及硫化矿床等。

三、太阳辐射和大地辐射

当把太阳（表面温度约为5900K）辐射和地球（地表温度为290K）辐射近似看成是黑体辐射时，光谱辐射通量的密度的分布曲线如图2-5所示。由图可见，太阳辐射最大值在可见光谱段，其峰值波长为0.47μm，而地球辐射则位于热红外区。

太阳辐射在大气上界处的垂直入射辐射通量密度称为太阳常数值，平均太阳常数值是1400W/m²，而通过大气到达地面的有效辐射通量密度为913W/m²，只占太阳直接辐射于大气上界的64.5%。图2-6给出了大气上界辐照度，海平面上太阳辐照度的分布曲线。该图给出的是平均日地距离上的太阳辐照度分布曲线。太阳常数值是有年周期变化的，近日点时，太阳常数值达到1438W/m²；远日点时，太阳常数值达到1345W/m²。由此可见，由日地距

离引起的太阳辐射通量密度的年内变化，可达7%。

地面或海面在接受太阳辐照度时，还因太阳高度角的变化而变化，太阳高度角大时，穿过的大气层薄；太阳高度角小时，穿过的大气层厚。事实上，太阳辐射在地面上的辐照度还因纬度与高度不同而变化。这需要进行专门的太阳辐射测量。

太阳辐射能量绝大部分分布在0.2μm到3.0μm的范围内，因此遥感技术常用的波段为0.32—1.1μm，其辐射通量密度占总辐射通量密度的85%以上。但是随着对地物光谱的深入研究，发现1.55μm及2.10μm附近，各类岩石有较明显的区别，因此占总辐射通量密度8%的1.4—2.5μm波段已成为极其重要的遥感波段。

地球辐射的能量来源主要为太阳的短波辐射和地球内部的热能，而与地球辐射直接相关联的则是地表的热平衡。这种热平衡一方面因太阳辐射引起地表增温，热能从地表向地壳一定深度传导；另一方面，地球内部的热能也要通过地壳传递到地表上

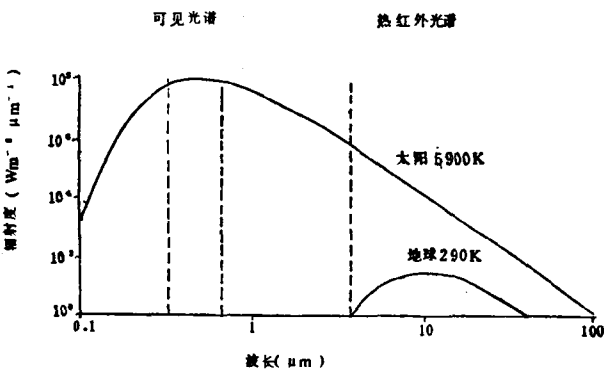


图 2-5 太阳和地球表面温度近似为5900K和290K绝对黑体时光谱辐射通量密度曲线

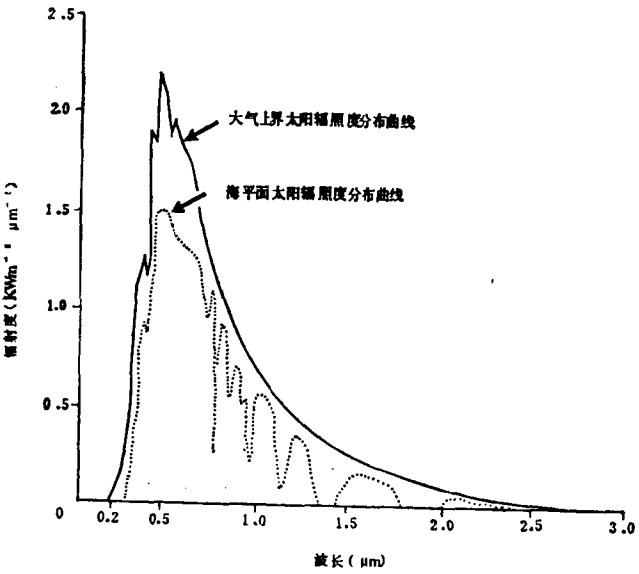


图 2-6 大气上界（实线）和海平面（点线）的太阳辐照度分布曲线
(据美国摄影测量和遥感协会的遥感手册)

来，两者在地表下一定深度处达到热量平衡。在平衡线以上主要受太阳辐射影响，地温随地球的自转与公转发生日变化与年变化；在平衡线以下的部位主要受地球内部热能分布的影响。因此，地球的长波辐射主要是由太阳短波辐射转化而来。

平衡线在地球上各处的深度是不同的。局部地区，地内热对流使地表温度急增，形成地热异常区，与周围地表的热辐射有很大差异，主要受地球内部热能的变化所控制。利用地热异常区在热红外的波谱特征，可用热红外遥感来研究地热。

海水的温度变化比大地复杂得多，因为海洋中有大、中、小不同尺度的涡流，还有海流、洋流等对流作用，因此海面的辐射研究更有其特殊的意义。

大地的温度是有变化的，温度变化时，其辐射的分布曲线各不相同。由图2-5可知大地辐射的能量分布在从近红外到微波段这一很宽的范围内（其峰值波长为 $9.7\mu\text{m}$ ），但大部分能量集中在 $8-14\mu\text{m}$ 之间。

遥感常用波段范围为 $8-14\mu\text{m}$ ，这波段的辐射能量占大地总辐射能量的50%；而 $3-5\mu\text{m}$ ，仅占总辐射量的1.0%以下；由于波长 $14-30$ 微米波段的辐射量占总辐射量的30%，所以近几年来对这个波段在正加紧研究用于遥感的可能性。 1mm 以上的微波波段，虽然所占能量很有限，但探测器的接收灵敏度高，因此被动式微波遥感也是广泛使用的一种遥感方式。

第三节 地球大气对电磁辐射传输的影响

太阳辐射必需经过大气才能入射到达地面，地面对太阳辐射的反射也要经过大气才能到达遥感平台被传感器接收。这就需要研究各种波长的电磁辐射在大气中的传输特性，寻找最佳的“通道”。同时，电磁辐射信息在大气中传输时会发生衰减和畸变，因而也必须研究大气窗口辐射传输的特性，对传感器所接收到的辐射信息进行辐射校正。

地球大气主要由多种气体及悬浮微粒等组成。归纳起来可将大气成分分为不变成分和可变成分两大类（见表2-2和2-3）。其中氮和氧的体积和质量占不变成分的99%左右，二氧化碳、氩等稀有气体仅占1%左右。

表 2-2 不变成分（干燥大气）的体积百分比

成 分	化 学 符 号	体 积 百 分 比
氮	N_2	78.084
氧	O_2	20.946
氩	Ar	0.934
二氧化碳	CO_2	0.032
氖	Ne	1.818×10^{-8}
氦	He	5.24×10^{-6}
甲烷	CH_4	2.00×10^{-6}
氪	Kr	1.14×10^{-6}
氧化氮	N_2O	5.00×10^{-8}
氢	H_2	5.00×10^{-8}
氙	Xe	9.00×10^{-8}

表 2-3 可变成分

种 类	分子式或成分
水(气态)	H ₂ O(水蒸气)
水(液态、固态)	H ₂ O(云、雾、雨、雪、冰晶)
臭 氧	O ₃
尘埃、工业污染	海浪中的盐粒、陆地尘埃、碳粒、 氨气、一氧化碳、硫化氢、氧化硫等

一、大 气 散 射

电磁波在穿过大气时,遇到各种微粒(气体分子、尘埃等)时会发生散射现象。散射的性质和强度取决于微粒的半径 r 与电磁波的波长 λ 两者之间的关系,引入比值因子 q :

$$q = 2\pi r / \lambda \quad (2-4)$$

式中, r 为微粒半径, λ 为电磁波的波长。

(一) 瑞利 (Rayleigh) 散射

$q < 1$ 时,即微粒半径 $r \ll \lambda$ 时的分子散射。主要是由大气分子引起,其散射强度与 λ^{-4} 成正比,且有方向性。波长越短的电磁波,散射愈强烈,如波长为 $0.3\mu\text{m}$ 的紫外线的瑞利散射能力是波长为 $0.7\mu\text{m}$ 的红光的30倍。所以波长较短的紫外线、蓝光散射较强,在遥感技术中,由于瑞利散射,难以利用紫外波段,而蓝光波段虽然可用(如TM的1波段),但其图像质量明显不如其他波段,反差小,需要经过处理才可使用。

(二) 米氏 (Mie) 散射

$q = 3$ 时,即微粒半径与波长接近,主要由大气中的烟尘、气溶胶等所引起。散射强度与 $\lambda^0 - \lambda^1$ 成比例。影响散射强度的因素包括微粒的数量、分布、直径、气候条件等。米氏散射的方向主要是向前散射。

(三) 无选择性散射

$q > 3$ 时,即微粒半径远比波长大时,散射强度与波长无关。由于这种非选择性的散射使云、雾呈现白色。

二、大 气 吸 收

大气中的主要成分——氮几乎不吸收太阳辐射,而氧仅吸收波长小于 $0.2\mu\text{m}$ 的紫外线。吸收太阳辐射的主要成分是水汽、臭氧和二氧化碳。太阳辐射被吸收后,使太阳辐射的连续光谱上产生许多吸收暗带如图2-7所示。水汽吸收的波长范围很广,其中 $0.7-3.0\mu\text{m}$ 波段是吸收强带。

臭氧主要吸收波长短于 $0.32\mu\text{m}$ 的紫外线。由于多种大气成分都吸收紫外线以及大气分子的强散射,所以在遥感技术中很少应用紫外波段。红外波段辐射的衰减,主要是由大气的吸收所造成的。微波波段辐射由于吸收引起的衰减则很小。

三、大 气 反 射

太阳电磁辐射通过大气时,在某一界面上引起的反射作用与其它界面反射情况相似,

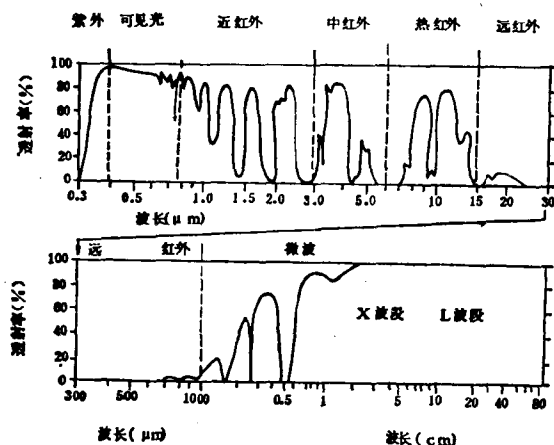


图 2-7 大气窗口

率高的电磁辐射波段称为大气窗口（图2-7）。

遥感使用的探测波段都在大气窗口之内。根据地面物体的电磁辐射特性，以及探测技术的发展，常用和有开发潜力的波段如表2-4所列。

表 2-4 大气窗口与遥感波谱通道

电磁波性质	大气窗口	常用波段	应用条件	成像方式	成像传感器	图像或像片类型
反 射	0.3—1.3 μm	紫外波段 0.3—0.315 μm 0.315—0.4 μm 可见光波段 0.4—0.7 μm 近红外波段 0.7—0.9 μm 0.9—1.3 μm	必须在强光照下 摄影和成像，即 只能在白天作业	摄 影 和 扫 描	紫外分光光度成 像仪 照相机 反束光导摄像机 多光谱扫描仪 激光雷达	紫外图像与像片 全色黑白图像与 像片 天然彩色像片 红外黑白图像与 像片 红外彩色像片 多波段图像与像片
		1.5—1.7 μm 2.0—2.5 μm	近红外 2.0—2.5 μm		红外扫描仪 多光谱扫描仪	红外黑白像片 红外扫描图像
	3—4 μm 4.5—5 μm	中红外 3.5—4.0 μm 4.5—5 μm	白天和夜间都能 成像 (全天候作业)			红外扫描图像
反 射 混 合 发 射	8—14 μm	远红外 10—11 μm 10.4—12.6 μm 8—14 μm		扫 描		红外扫描图像
	Ka 0.8—1.1cm K 1.1—1.7cm Ku 1.7—2.4cm X 2.4—3.8cm C 3.8—7.5cm S 7.5—15.0cm L 15.0—30.0cm P 30.0—100.0cm	0.86cm 3和3.2cm 25cm	有光照和无光照 下都能成像 (全天候作业)		微波扫描仪 微波雷达	微波扫描图像 微波雷达图像

（引自杨凯等著《遥感图像处理原理与方法》）

第四节 地物波谱特征

一、地物波谱曲线与波谱分析

地物的电磁波波谱是遥感的一种基本信息——波谱信息。物体在同一时间、空间条件下,其发射、反射、吸收和透射电磁波的特性是波长的函数。地物的反射光谱特征,通常以横坐标代表波长,以纵坐标代表光谱反射率或光谱亮度系数作出的相关曲线,是地物的反射波谱曲线。不同的物体由于其组成成分、内部结构和表面状态以及时间、空间环境的不同,电磁波的辐射性能也不同,即具有不同的波谱曲线形态。同类地物有相似的波谱曲线形态,因此,地物波谱是遥感识别地物的主要依据。为了识别地物,必须掌握各种地物波谱曲线上某些重要特征,如植物都在 $0.45\mu\text{m}$ 、 $0.65\mu\text{m}$ 、 $1.45\mu\text{m}$ 、 $1.95\mu\text{m}$ 处有吸收谷,在 $0.76\mu\text{m}$ 附近有一个反射峰,使波谱曲线陡升。

对地物波谱曲线形态的分析,除曲线的形态特征外,还可以对曲线上的峰和谷所在的波长位置,峰的高度(或深度)、宽度、斜率 and 对称度等加以比较。

目前地物波谱在遥感技术中的应用主要有反射波谱、发射波谱和微波波谱。其中可见光和近红外区的反射波谱特性应用最广,研究较深。

二、反射波谱和发射波谱

(一) 反射波谱

反射波谱是某物体的反射率(或反射辐射能)随波长变化的规律,用一曲线来表示,此曲线即称为该物体的反射波谱。物体的反射波谱限于紫外、可见光和近红外波段。一个物体的反射波谱特征主要取决于该物体与入射辐射相互作用对波长的选择,即对入射辐射的反射、吸收和透射的选择性,其中反射作用是主要的。物体对入射辐射的选择性作用与物体的组成成分、结构、表面状态以及物体受到所处自然和人工环境造成的影响。在漫反射情况下,物质组成和结构是影响反射波谱的主要因素。

地物反射率可用 $0.3-2.5\mu\text{m}$ 的光谱辐射计来测定。测定的方法是将被测地物与已知反射率的白板(标准板)相比较,求出地物的反射率 R 。

$$R = \frac{I}{I_0} R_0 \quad (2-5)$$

式中, I ——仪器测得的地物的反射辐射通量读数; I_0 ——仪器测得的白板的反射辐射通量读数; R_0 ——已知白板的反射率。

地物反射波谱可以在实验室内对采回来的样品进行测试,也可以到野外实地测试,还可以在地面和空中同步测定地物的反射波谱,进行对比,分析大气对反射辐射的影响。

(二) 发射波谱

用曲线表示某物体的辐射发射率随波长变化的规律,此曲线称为该物体的发射波谱。目前对物体发射波谱的研究主要集中在 $3-5\mu\text{m}$ 和 $8-14\mu\text{m}$ 波段。对 $8-14\mu\text{m}$ 波段的发射波谱可以用辐射计来测量地物亮度温度 T_B 和发射率 ϵ ,即亮度温度是发射率与实际温度 T 的乘积: $T_B = \epsilon T$ 。

发射率对描述和分析物体表面或材料的电磁辐射特性具有和反射率同等重要的作用。

任何物质在温度 T 时都处于热状态，并发射与其温度相应的电磁波辐射。发射率是地物光谱辐射率与同温度下黑体光谱辐射率之比。由于测定物体的发射率要比测定物体的温度特性更困难，加之地物之间的发射率差异又小，而物体之间有较小温差就会造成发射辐射能量较大的差异（ $M = \varepsilon \sigma T^4$ ），因此在应用时往往用测量温度或发射辐射能量——热来区分地物。不同物体因其热学性质及其所处环境的不同，往往存在一定的温差，因此，热红外遥感比较容易检测到物体的这些信息。

三、水体的波谱特征

除海洋是大片水体外，陆地上也有河、湖、海湾、池塘和水库等水体。由于水体和陆地的反射、吸收和透射特征不同，在遥感图像上的影像特征也迥然不同，水陆界线异常清楚。各种水体在遥感图像上有共同特征，但在不同波段的遥感图像上其影像仍有差别。

图2-8是不同水体的反射波谱特性曲线，曲线表明水体的反射波谱主要受水的混浊度、微生物含量、叶绿素含量、水深及水波浪情况等因素的影响。

水体的反射率（除镜面反射方向外），在各个波段内都较低，一般都在3%左右，在近红外部分更为突出。清水的反射率一般在可见光部分为4—5%，在 $0.6\mu\text{m}$ 处下降至2—3%，到 $0.75\mu\text{m}$ 以后的近红外波段，水成了全吸收体。混浊水的波谱曲线随着悬浮泥沙浓度的增加而增高。

由于水体具有比热大，热惯性大，对红外线几乎是全吸收，自身辐射率高等特点，所以红外波段上水体几乎呈现均一的黑色。夜间成像时，水体因温度高呈现浅色调。固体雪在可见光波段均呈浅色调。

四、植被的波谱特征

植被是地面最广布的地物，植被对自然环境的依赖性又大，所有植物都含有叶绿体，而叶绿体及植物细胞结构有特殊的光谱效应，因而植被在遥感图像上较易识别，并且成为指示自然地理环境（如气候、水份等）的最好标志。

图2-9表明，尽管植物种类不同，但仍有相似的反射波谱曲线。植物的基本波谱特征是：在可见光绿波段 $0.55\mu\text{m}$ 附近有10—20%的反射峰，近红外线 $0.8—1.0\mu\text{m}$ 间具有50—

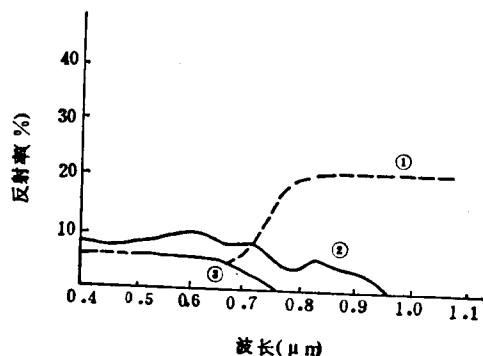


图 2-8 水体的反射波谱曲线
①藻类浮游物，②含沙水流，③清水

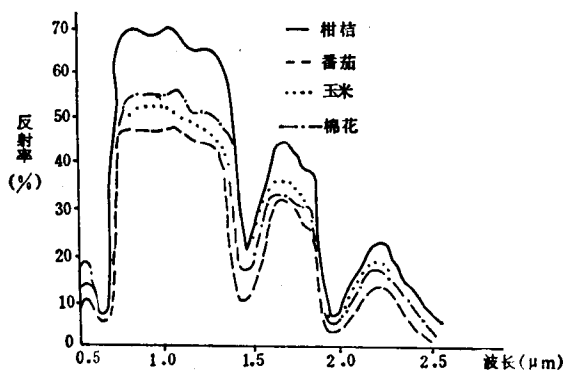


图 2-9 不同植物的光谱曲线比较

60%的强反射峰，直至3.0 μm 部分是衰减曲线。在红波段0.7 μm 和近红外线1.5 μm 和1.9 μm 附近具有强烈吸收。究其原因，红波段的吸收是由叶绿素吸收引起的，近红外波段的吸收是由细胞液和细胞膜的水分子造成的。

图2-10表示不同健康状况的植物具有不同的反射率。从图中不难看出：健康的松树在可见光范围内，其反射率稍低于有病虫害的松树；在近红外部分则高于后者。同时还可看出病虫害程度加深，在近红外部分的反射率降低更多。

实验还表明，不同种间的植物或不同环境的植物的反射率差异明显，集中表现在近红外波段和红波段，因此，分析这两个波段的反射率可对植被进行遥感研究。

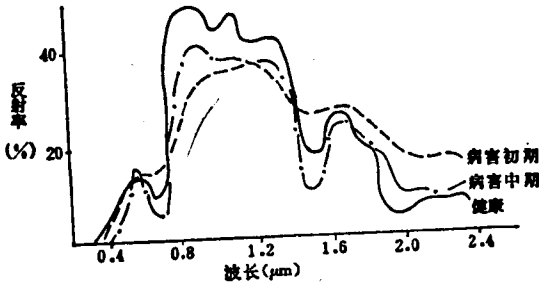


图 2-10 不同健康状况的松树光谱曲线比较

岩浆岩、沉积岩和变质岩三大类的地物波谱特征，在第六章相应章节内具体说明。在此简述其基本特点。①岩石的反射波谱特征与矿物晶体中电子跃迁和分子振动有关。其中岩浆岩波谱与铁离子、羟基和水关系密切；沉积岩则除上述因素外，还与碳酸根等阴离子团有关；变质岩的波谱除上述因素外，还与铁、铝、钼等金属离子有关，并在某些波长范围内产生明显的吸收谷（图7-1，7-7，7-9）。②在反射强度上岩浆岩的反射率随 SiO_2 含量减少而降低，其规律性强。沉积岩以碳酸盐岩反射强度较大，碎屑岩次之，粘土岩类尤其含铁离子及有机物质粘土岩类反射强度最低。区域变质岩类反射强度变化规律不明显。③影响岩石反射强度变化的因素，除物质组分外，还有岩石结构、构造以及产出地区的外部自然环境。总的特点是：岩石表面粗糙、裂隙发育、湿度较大、颜色较暗、风化较深的反射强度偏低。

上述只是一般性特点，实际工作必须通过地物波谱实测，识别不同地区的各种岩性的波谱曲线特征，通过分析鉴定、解释各种因素对波谱产生的影响，才能有效地用地质体的波谱信息来识别地物。

五、岩石的波谱特征

(一) 岩石的反射波谱的基本特点

大多数岩石都是一种以上矿物的集合体。岩石在可见光和近红外波段的波谱特征十分复杂，难于直接用它来鉴定岩石。但地物波谱却能充分反映它的基本物质成分和结构特点，是识别和区分岩类的重要依据。

表 2-5 主要岩石磨光面在波长8—13 μm 的发射率

岩石名称	发射率	备 注
石英安山岩	0.91—0.93	溶岩， SiO_2 含量68.72%
花 岗 岩	0.88—0.90	粗粒
石英闪长岩	0.91—0.92	SiO_2 54.64%
辉 长 岩	0.84	SiO_2 52.05%
结 晶 片 岩	0.84—0.96	SiO_2 51.88%
玄 武 岩	0.69	橄榄石变质，部分蛇纹岩化
橄 榄 岩	0.88	SiO_2 41.00%

(引自长谷线和)

(二) 岩石的发射波谱

物体发射率(表2-5)与其表面特性——粗糙度、色调有关。一般说来,粗糙表面比平滑表面发射强,暗色目标比浅色目标有较高发射率。所以在同样温度条件下发射率高的物体热辐射强。例如,碳酸钙(CaCO_3)含量达95%以上的大理岩具有0.942的发射率,而二氧化硅(SiO_2)含量达90%以上的石英岩,其发射率为0.627,大理岩的热辐射比石英岩强,在红外影像上色调更浅些。

根据基尔霍夫定律: $\alpha(\lambda) = \varepsilon(\lambda)$,我们可以由地物的吸收率来确定发射率。地质体热红外发射波谱可以根据其反射率来推算,即 $\varepsilon = 1 - \rho$ 。岩浆岩的发射波谱就是用此方法得到的(图2-11)不同岩性发射率极小值所对应的波长是不同的,例如,酸性花岗片麻岩在 $8.8\mu\text{m}$ 处,中性安山岩在 $9.7\mu\text{m}$ 处,基性玄武岩在 $10.4\mu\text{m}$ 处,超基性橄榄岩在 $10.7\mu\text{m}$ 处,随着 SiO_2 的百分含量的减少,最小发射率值所对应的波长将随之增大。可以推断,使用热红外遥感可以进行岩浆岩的岩类识别。

在热红外波段($8-14\mu\text{m}$),岩石性质——热惯量和反射率,对岩石热辐射有重要的影响,对于反射率相同的岩石来说,那些具有高热惯量的岩石比那些具有低热惯量的物质温度变化要小些。白天午后,热反差最大,夜晚最大的热反差发生在黎明前。对于具有

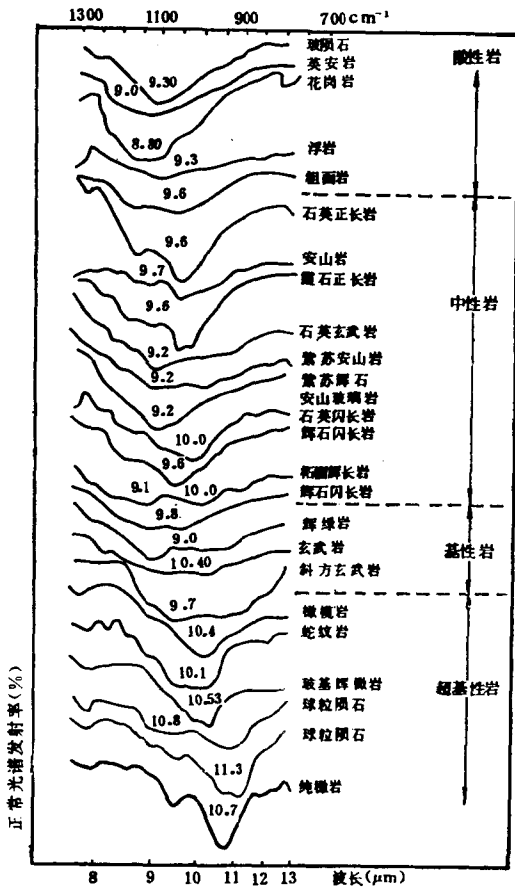


图 2-11 某些岩浆岩的发射波谱曲线
(据Barrett)

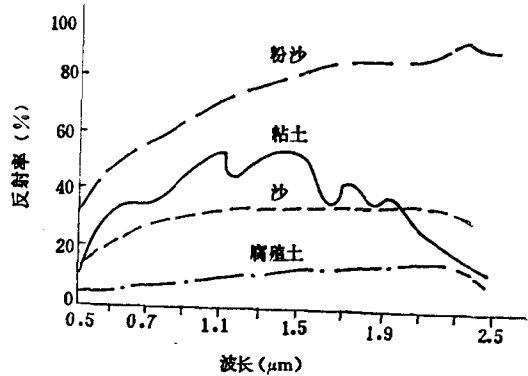


图 2-12 印度安州土壤样品波谱曲线
(在相同温度条件下测量反射率)

相同热惯量但反射率不同的岩石而言,最大的热反差出现在中午前后,最小的热反差在黎明。值得注意的是,深色岩石(低反射率)比浅色岩石(高反射率)有较高温度和较大的温度范围。因此,黎明时刻是记录由于岩石热性质差别而产生的温度反差的 最佳时间。因为此时岩石的热惯量的影响最大,而反射率的影响最小,即太阳辐射的影响最小。岩石与其它地物相比,它的辐射温度日周期变化最为显著。

六、土壤的波谱特征

不同质地的土壤，其波谱反射率是不相同的，如图2-12所示。粉沙反射波谱曲线整体都高；腐殖土则最低，反射率在0.1左右。反射率与机械组分有关。

基岩上的风化残积物，因颗粒细，反射波谱与基岩相似。干燥残积土的反射率要比基岩的高；当残积土比较湿润时，其反射率则比湿润基岩的低。可见反射率与含有水分的多寡密切相关。

土壤波谱还受土壤理化参数（盐分类型、含量、碱化度等）的影响。从 $0.4-1.05\mu\text{m}$ ，波谱曲线在总轮廓上是上升的，盐渍土的反射率要比非盐渍土高得多，并随着盐渍程度的加重，曲线向上平移。

总之，土壤的反射波谱特征有一定规律性。对土壤波谱特征有影响的基本因素是腐殖质和氧化铁的含量、湿度、粒度大小、矿物成分、盐分和表土结构。

七、城市地物的波谱特征

城市地物主要有水体、植被、人工建筑物等几种。

水体和植被的波谱特征前已论及，这里仅讨论城市建筑物、道路和垃圾（城市废物）的波谱特征。

由于遥感图像反映的是一个俯视的平面图，因此在遥感图像上见到的建筑物只是它的屋顶。图2-13所示的建筑物屋顶的波谱特征是因建筑材料的不同而有差异的。灰白色的石棉瓦反射率最高。沥青沙石房顶由于表面铺盖着土黄色沙石，该色调决定了其反射率高于灰色的水泥平顶。铁皮屋顶表面呈灰黑色，反射率低且平坦。绿色塑料顶棚的波谱曲线在绿波段有一反射峰，这与植被的相似，但是它没有植被 $0.68\mu\text{m}$ 的吸收峰和近红外波段的强反射峰，依此区别于植被。

道路因所用建筑材料不同，可分为水泥路、沥青路、土路等，波谱曲线形状大体相似（图2-14）。 $0.4-0.6\mu\text{m}$ 波段缓慢上升， $0.6\mu\text{m}$ 之后转向平缓变化。水泥路呈灰白色，反射率最高，依次为土路、沥青路。

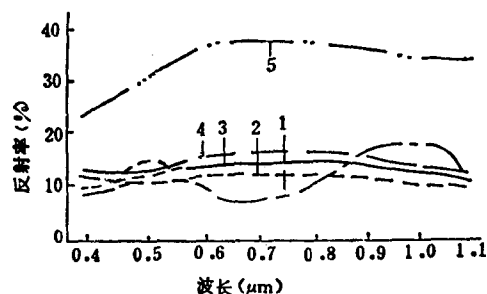


图 2-13 建筑物屋顶的波谱特征

1. 塑料顶棚；2. 铁质屋顶；3. 水泥平顶；4. 沥青沙石屋顶；5. 石棉瓦顶

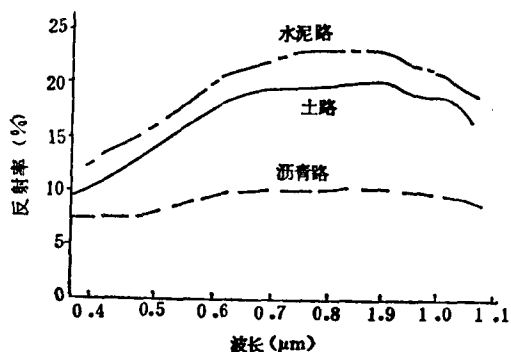


图 2-14 各种道路的波谱特征

城市废物和垃圾分为工业垃圾和生活垃圾。工业垃圾常指工业固体废弃物，如钢渣、矾土渣、煤矸石、粉煤灰等。如图2-15所示，工业垃圾波谱曲线比较平坦，而生活垃圾由

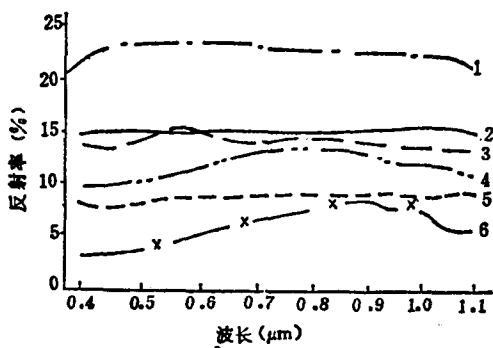


图 2-15 城市垃圾的波谱特征

1. 粉煤灰; 2. 矾土渣; 3. 煤矸石;
4. 钢渣; 5. 炉渣; 6. 生活垃圾

于成分较杂曲线不规则。在工业垃圾中, 冶金工业的冶炼渣 (如钢渣、炉渣) 反射率较低, 而采煤业的煤矸石、粉煤灰反射率较高。上述数据资料对城市环境遥感调查是很有用的。

八、地物波谱的时间效应和空间效应

(一) 时间效应

指同一地点的相同地物, 其波谱特征会随时间而产生一定的变化, 这种由于时间推移而导致的地物电磁波谱特征的变化, 称为地物波谱的时间效应。例

如, 某地的水稻, 随着生长期不同, 其波谱特征有一定差异, 这种差异就是时间效应。实际上, 由于各种因素的影响, 几乎所有地面上的物体都会产生时间效应。

(二) 空间效应

在同一时刻、同一类地物, 由于其所处的地理位置不同, 其波谱特征可能存在一定差异, 这种由于空间位置不同导致同类地物之间波谱特征的变化, 叫做地物波谱特征的空间效应。例如生长在不同地点的同一类植物, 由于生长条件的不同, 长势也不同, 其波谱特征也就不同; 而同一种岩性 (如碳酸盐岩) 在不同气候下其风化特征、风化类型也不同, 其相应的波谱特征就会有一定差别。

时间效应和空间效应使得地物的波谱特征具有相对不稳定性。实际应用时, 要通过对不同自然环境地区的典型地物 (岩性、植被等) 的波谱实测, 来建立区域性地物波谱标准, 来了解时间、空间效应引起的变化和影响因素。当然对于同一类地物, 特别是状态较稳定的地物, 无论其时间、空间条件如何, 它们的波谱曲线的形态总是相似的, 总是存在一个代表型的特征, 究其原因, 是地物对波谱特征起主导控制作用的内在因素并没有改变。由此我们有可能对地物波谱进行分类。有时我们还需要利用地物波谱的时间效应和空间效应, 尤其是时间效应, 进行遥感动态分析。

第五节 色 度 学

大自然的景物五颜六色, 但总的来说, 颜色分为消色 (黑白) 与彩色两大类。对入射光各种波长的单色光都是非选择性吸收与反射的物体称消色体。对入射光进行选择性吸收与反射的物体称彩色体。反射什么色光, 物体就呈现什么颜色。

各种颜色都是光作用于肉眼引起的视觉反映, 无光就无色。光辐射中能引起人眼视觉的波长是 $0.38-0.76\mu\text{m}$, 即可见光波段。

一、彩色三要素

彩色是可见光的一种属性, 是一定波长范围内的电磁波在人眼中所引起的视觉反映。彩色可以用色调、饱和度和明亮度或强度三要素来描述。

色调：即颜色的类别，例如红、黄、绿、蓝色等等，色调是对物体进行区分的主要标志。物体的色调取决于照明光源的光谱组成和其表面所反射的各波长的辐射量的比例。

饱和度：是指彩色的纯结程度、白色的数量。可见光光谱中的各种单色光有最高的饱和度。物体颜色的饱和度则决定于物体表面反射光谱辐射的选择程度，物体对光谱中某一较窄波段的反射率很高，而对其它波长的反射率很低或无反射时，表明它有很高的光谱选择性，其颜色的饱和度就越高。

明亮度：指颜色在视觉上引起的亮暗程度。例如，消色的暗亮顺序如下：黑、浅黑、淡黑、深灰、灰、浅灰、灰白、白，当然还可进一步细分为更多的等级。彩色也具有不同的明亮度。彩色光的亮度愈高，人眼就愈感觉明亮，可用色光的光流来表示明亮度。例如，一张红纸，放在白光下，用手挡住一部分光，使在红纸上出现部分阴影，影子内外的红纸看起来都是红色的，但有差别，这差别就是明亮度不同，影子外部反射出来红光光流大，则明亮度大，影子部分反射出来红光的光流小，明亮度也小。表现出同一种颜色的鲜艳程度不一样。

二、三基色原理

通常把红、绿、蓝三色称为三基色，任何一种颜色均可由三基色按一定比例组合形成。因此任何一种彩色都可用三基色的比例来表示，这样一来，传送彩色信号就大为简化了。因为要使彩色重现，并不需要传送原景物反射光的光谱分量（其数量可能是很大的），而只需传送三个不同比例的基色信号即可。

国际上规定三基色的三个单色光波长为：红—— $0.7\mu\text{m}$ ；绿—— $0.5461\mu\text{m}$ ；蓝—— $0.4358\mu\text{m}$ 。

由色光相加和相减实验得知：

①红（R），绿（G），蓝（B）色光两两相加即可合成三种间色光：

$$R + G = Y \text{ (黄光)}$$

$$G + B = C \text{ (青光)}$$

$$B + R = M \text{ (品红)}$$

②两种色光相加成为白色的，这两色称为互补色，互补色也可由白光中减去三基色得到。如从白光中减去红色得到青色，则红色和青色称为互补色（图2-16），类似的，黄和蓝、品红和绿色也为互补色。

三、多光谱摄影

要把自然界物体的颜色记录下来，并再现它，可根据色觉原理，采用多光谱摄影技术来实现，即经过色光的分解与合成两个过程来完成。

多光谱摄影术有三项基本内容：

- ①利用滤色镜进行景物的彩色分解；
- ②胶片的加工处理；
- ③在加色摄影系统中进行彩色合成。

假定我们用加色摄影术来拍摄一组彩色谱的照片，这组彩色谱的构成如图2-17（a）所示。为了得到图2-17（b）所示的分色负片，需采用下列方法：

- ①在照相机的透镜上加红滤色镜，装上黑白底片，拍摄景物照片；
- ②不移动相机，用绿色镜代替红滤色镜，再用黑白底片拍摄景物照片；
- ③用蓝滤色镜代替绿滤色镜，再拍摄景物，将三张底片冲洗出来，其密度如图2-17(b)所示。

在加色投影之前，将上述负片印成正片，如图2-17(c)所示。显然正片的影像密度(或叫灰度)和负片正好相反。

然后在观察屏幕上将三张正片的影像再合成，方法如下。将三张正片分别放在三个投影仪中(图2-17(d))，在投影仪的光源前分别放置红、绿、蓝三种滤色镜。调整三个投影仪，使屏幕上的三个投影图像严格重合。按照颜色的加色再现原理，三张正片影像通过投影组合，使原景物的颜色获得了再现(图2-17(d))。由上可见，具有多种颜色的景物，可用多光谱摄影术使其彩色准确再现。遥感图像光学处理的彩色合成(见

阅第六章第一节)就是利用多光谱摄影的方法，来增强图像上某些信息的(表2-6)。

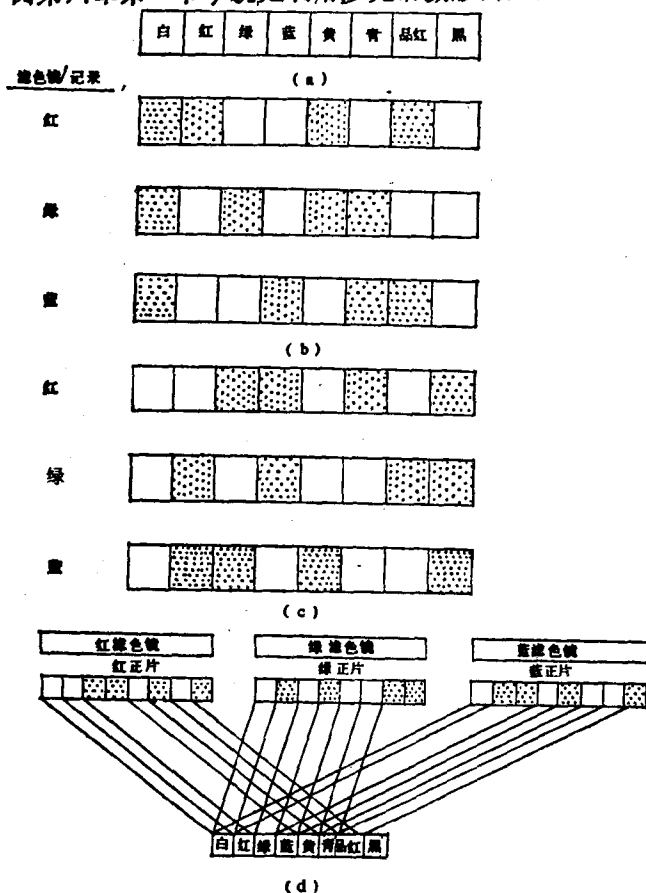


图 2-17 利用加色多光谱技术使彩色再现
a.原景物；b.卤化银微粒经相机曝光和显影后，多光谱负片的记录剖面图；c.从负片印成正片经冲洗加工后，多光谱正片记录的剖面图；d.原景色调的加色再现

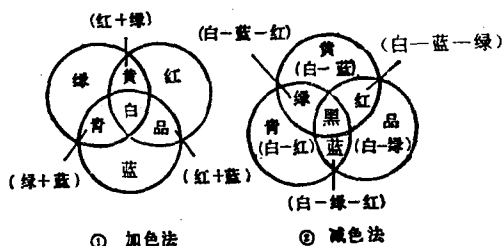


图 2-16 三基色图

四、色度图

彩色光的性质可进一步地用色度图(图版1)来说明。色度图中的彩色是用数学方法推导出来所有可能产生的彩色所需的每一基色的相对百分比，并作为一个色度点而画出来的。

对一种给定的彩色，色度图中的坐标代表每种基色出现的相对的份额，这些坐标规定如下： X = 红， Y = 绿， Z = 蓝。因为三基色的总和必等于1，所以有下列关系式：

$$x + y + z = 1 \quad (2-6)$$

$$\text{或 } z = 1 - (x + y)$$

$$(2-7)$$

因为 z 能够从这些坐标，利用式(2-7)求得，所以色度图中只要求规定 x 和 y 。例如，在图版1中坐标成绿的点，近似有62%的绿和25%的红。由式(2-7)得出蓝的成份近似为13%。

从在380 nm处的蓝色到

表 2-6

彩色谱的颜色	合成或加色后的颜色
黑色	它的影像在三张正片上均完全不透明, 由于没有光线投向屏幕, 故该彩色谱片的颜色在合成后为黑色
白色	它的影像在三张正片上均透明, 故红、绿、蓝三种光线均能通过该影像而投向屏幕, 红、绿、蓝合成后呈白色
红色	其影像仅在红正片上透明, 故只有红光投向屏幕, 绿、蓝光则被照片上的高密度所挡住
绿色	其影像仅在绿正片上透明, 红蓝光均不能投影到屏幕上, 故得到的影像为纯绿
蓝色	其影像仅在蓝正片上透明, 绿、红光均不能被投影, 故影像呈蓝色
青色	其影像在绿和蓝正片中透明, 红光不能被透过。绿和蓝相加得青色
黄色	其影像在红和绿正片中透明, 红和绿相加呈黄色
品红色	在绿正片中, 其影像不透明, 但在红、蓝正片中影像透明, 红和蓝光透过影像后在屏幕上形成品红色

760nm处的红色的各种谱色的位置已经标在色度图的舌形边界上。在图版1的色谱中, 在色度图的内部而不是在边界上出现几种彩色, 代表谱色的某种混合。示于图版1中的等能量的点相应于三基色的能量组成相等, $x = y = z = \frac{1}{3}$, 它代表了CIE标准的白光。该色度图的舌形曲线即谱的轨迹, 即色度图边界上的任何点为完全饱和点。当一个点离开边界趋向于等能量点, 那就是有更多的白光加到这个颜色中, 同时它变为不饱和。在等能量点上饱和度为零。

在色度图中连接任何二点的一条直线段, 代表着由这二种颜色叠加而得的不同颜色。例如, 从红到绿的点画一直线, 若红光比绿光多, 则代表新颜色的点将在这个直线段上更靠近红的位置。同样地, 从等能量点到边界上的任何点画一直线, 则定义了一个特定谱色的所有彩色。

第三章 遥感图像类型与特性

第一节 成像遥感技术系统

成像遥感技术系统以探测和记录地物某一电磁波谱的电磁能量,产生地面鸟瞰图像为主要目的,由遥感平台、遥感器和遥感地面站组成。

一、遥感平台

指放置遥感器的运载工具。按高度可分为地面、航空和航天平台。在不同高度进行多平台遥感,可获得不同比例尺、分辨率和地面覆盖面积的遥感图像。

(一) 遥感平台的类型

地面平台 高度一般小于300m,用于近距离测量地物波谱特征和获取试验研究的地物细节图像等的地面遥感。

航空平台 是指在大气层内飞行的飞行器,高度为100m—30km,主要有飞机、直升机、飞艇、气球等。

航天平台 是指在大气层之外飞行的飞行器,高度几百、几千至几万公里,如人造地球卫星、探空火箭、宇宙飞船、航天飞机、太空站等。

(二) 卫星轨道参数与轨道类型

卫星运行特征取决于下列卫星轨道参数:半长轴、偏心率、倾角、升交点赤经、近地点角距、过近地点时刻。遥感中常用轨道高度、轨道周期、轨道倾角、轨道类型、升(降)交点时间等描述卫星的运行特征。轨道周期是卫星在轨道上绕地球一周所需的时间,决定卫星每天绕地球运行的圈数及重复飞越同一地面点的覆盖周期。卫星轨道平面与地球赤道平面的夹角称轨道倾角(i),用以确定轨道平面在太空的位置及轨道覆盖地球表面的范围。当 $i=0^\circ$ 时,轨道平面与赤道平面重合,称赤道轨道,若卫星运行方向与地球自转方向一致且运行周期与地球自转周期相等时,称地球静止轨道。当 $i=90^\circ$ 时,轨道面与赤道面垂直,称极地轨道,可以覆盖整个地球。其它的均称倾斜轨道,卫星运行方向与地球自转方向一致, $0^\circ < i < 90^\circ$,称顺行轨道;相反时, $90^\circ < i < 180^\circ$,称逆行轨道。

卫星质心与地心连线同地球表面的交点称星下点,该点在卫星飞行过程中在地面移动的轨迹称星下点轨迹或地面轨迹。当 $i \neq 0^\circ$ 时,轨道与赤道面有两个交点,卫星由南向北飞行时的称升交点,由北向南飞行时的称降交点。由于地球自转,若 $i > 90^\circ$,升交点西退,降交点东进;若 $i < 90^\circ$,则升交点东进,降交点西退。

太阳同步轨道指卫星轨道面与太阳光之间的夹角(太阳光照角)始终保持一致的轨道,在一年中进动 360° ,即卫星轨道面相对于地球的角进动与地球绕太阳公转的角速度相等(图3-1)。

(三) 卫星运行姿态

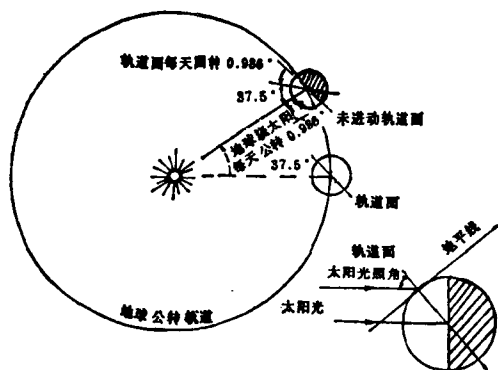


图 3-1 卫星轨道与太阳同步

(据冯纪武, 1991)

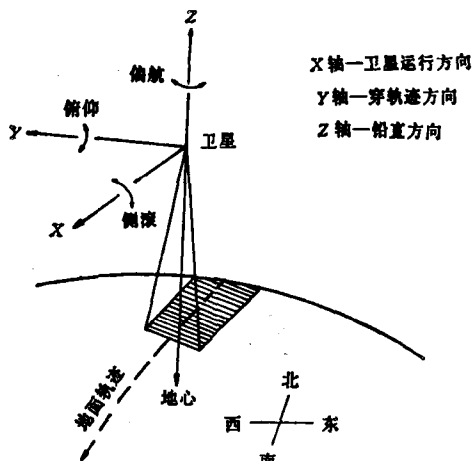


图 3-2 卫星三轴定向示意图

(据华瑞林, 1990)

卫星在轨道上运行, 处于失重无阻力状态, 很容易产生俯仰、侧滚和偏航, 必须对卫星的X、Y、Z三轴定向(图3-2), 随时调整姿态, 以使遥感器始终对准地面。

(四) 几种航天平台运行特征

1. 陆地卫星系列

陆地卫星(Landsat)是美国航空和宇宙航行局设计和发射的地球资源考察卫星系列, 现已发射了5颗(表3-1)。Landsat-1,2,3星体相同, 呈蝴蝶形(图3-3); Landsat-4,5为可重复使用的多用途标准件组合式航天器(图3-4)。

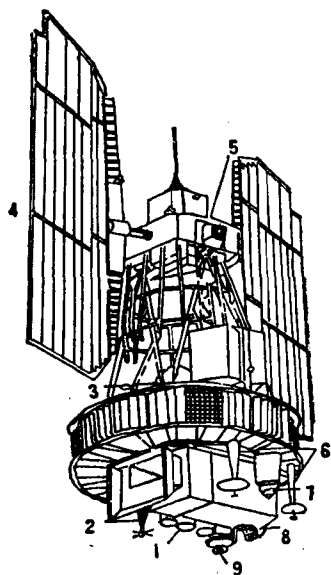


图 3-3 Landsat-1,2,3结构图

(据陈述彭, 1990)

1. 返束光导管摄像机(3台); 2. 数据收集系统天线; 3. 轨道调整喷嘴; 4. 太阳能电池帆板; 5. 姿态控制分系统; 6. 宽带天线(2); 7. 通用天线; 8. 多谱段扫描仪; 9. 姿态传感器

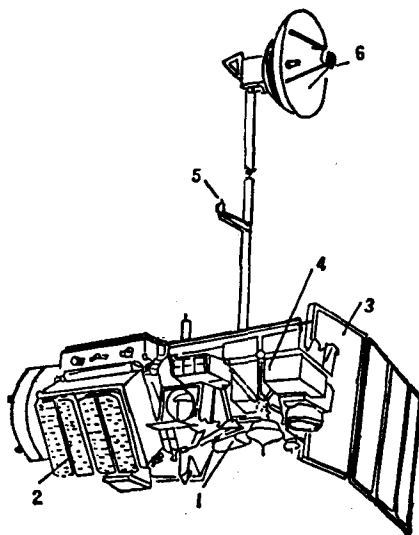


图 3-4 Landsat-4,5结构图

(据陈述彭, 1990)

1. 专题成像扫描仪; 2. 多功能舱; 3. 太阳能电池板; 4. 多谱段扫描仪; 5. 导航星全球定位系统天线; 6. 高增益天线

表 3-1 Landsat SPOT轨道参数及有关数据表

卫星 参数	Landsat-1,2	Landsat-3	Landsat-4,5	SPOT-1
轨道倾角	99.114°	99.143°	98.2°	98.72°
轨道高度(km)	918	916.6	705	832
半长轴(km)	7285.82			7200.50
半短轴(km)	7272.82			
偏心率	0.0006	0.001		0.0011
轨道周期(min)	103.267	103.0	98.9	101.4
飞行速度(km/s)	7.399	7.416	7.500	
星下点平均速度(km/s)	6.47	6.454	6.753	
过降交点地方时间	9:42/9:30	9:30	9:38	10:30
总扫描角	11.56°	11.56°	15.03°	
扫描条带宽度(km)	185	185	185	60/117
赤道上当天两圈距离(km)	2862	2862	2763	1084
赤道上相邻两圈距离(km)	159.38	159.661	170	108.4
赤道上条带的旁向重叠(%)	14	14	7.6	
每天轨道运行数(圈)	14	14	14.5	14.24
覆盖, 圈数	251	251	233	369
覆盖周期	18	18	16	26
相邻轨道时间间隔(天)	1	1	7	1
遥感器	MSS/RBV(3台)	MSS/RBV(2台)	MSS/TM	HRV
轨道类型	圆形近极地太阳同步轨道			

2. 地球观测试验卫星

地球观测卫星(SPOT)由法国国家空间研究中心设计制造。外形似长方形箱体,采用积木式结构,由多功能平台和有效载荷两部分组成(图3-5)。

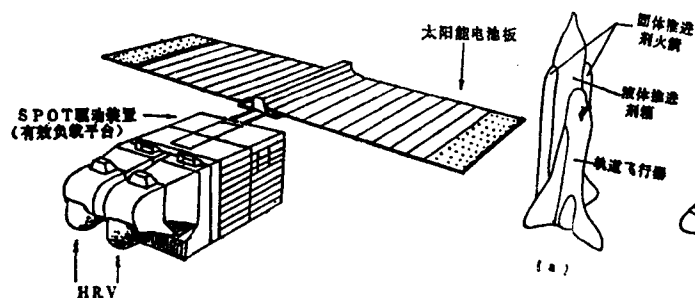


图 3-5 SPOT星体结构图
(据陈钦密, 1988)

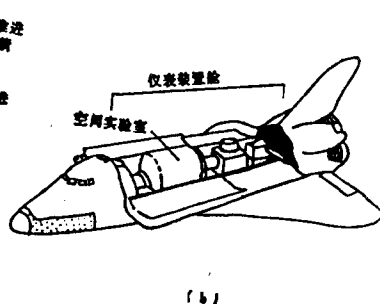


图 3-6 航天飞机结构图
(据陈钦密, 1988)

(a) 起飞时的航天飞机, (b) 进入轨道后的航天飞机, 机上有空间实验室装置

3. 航天飞机

航天飞机既可象火箭一样在地面垂直起飞, 作为空间运载工具运送、回收、修理轨道卫星和星际探测器; 又能象卫星一样在轨道上运行, 并带有一定的遥感器进行多学科遥感研究; 还可象飞机一样在地面水平降落, 回收设备, 多次重复使用; 是一种兼有航天与航空飞行能力、有人驾驶、其它主要部件可重复使用的太空飞行器(图3-6)。

4. 国土资源普查卫星

我国于1985年10月21日发射了国土资源普查卫星（简称国土卫星），外形为钝头圆锥体，由再入舱和仪器舱组成（图3-7）。再入舱又称胶片回收舱，舱内装有由地物像机拍摄的影像胶片，完成任务后返回地面，仪器舱在轨道上自行殒毁。国土卫星的轨道为低轨、椭圆、非太阳同步轨道，远地点高度400—500km，近地点高度150—200km，轨道周期90分钟，倾角63°，由西北向东南飞越我国。

二、遥 感 器

远距离感测地物环境辐射或反射电磁波的仪器称遥感器，它通常被安装在遥感平台上。能对目标摄像或通过扫描取得数据的遥感器称为成像遥感器，它是成像遥感技术的核心。

（一）遥感器的基本组成及工作原理

遥感器是收集、检测和记录电磁波信息的工具，主要由以下四个系统组成（图3-8）。

1. 收集系统

其功能是接收电磁波并将其聚焦成像，然后送往探测系统。

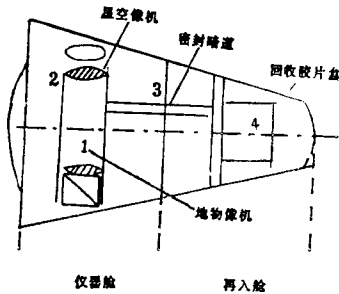


图 3-7 国土卫星结构图
（据华瑞林，1990）

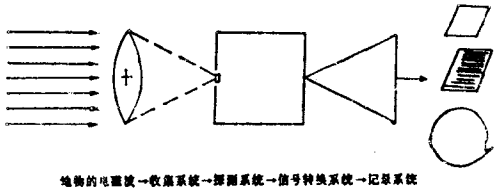


图 3-8 遥感器的基本组成
（据马万力，1984）

2. 探测系统

遥感器的探测系统主要是光电探测器，即对电磁辐射敏感，能将辐射能转换成电信号的探测器。成像遥感器的主要探测元件为光子探测器（又称量子探测器）。

3. 信号转换系统

除感光胶片是直接吸收光能，发生光化学反应形成潜像，经显影、定影处理获得影像外，其它探测器元件输出的都是电信号。信号转换系统的功能就是进行电光转换，将电信号转换为便于传输、显示、记录、处理的光信号。

4. 记录系统

其功能是将探测系统或信号转换系统输出的电磁波信息（光信号）记录、存储到遥感信息载体上，再以影像或数字形式输出。遥感信息载体指记录、存储成像遥感器输出信号的介质，如感光材料和磁带等。

（1）感光材料

感光材料是指凡经曝光后能发生光化学变化，经一定的化学、物理方法处理产生固定影像的材料的总称，分黑白和彩色感光材料。由感光乳剂和支持体构成。以透明片基为支持体的称为感光胶片，以纸基为支持体的称为像纸。

感光材料对不同色光的敏感程度即感色性不同：①色盲片，仅能感 $\lambda < 0.5\mu\text{m}$ 的紫、

蓝光；②正色片（分色片），感光范围扩大至 $0.6\mu\text{m}$ ，能感绿、黄光，对绿光的敏感性高于全色片；③全色片，感光范围扩大至 $0.72\mu\text{m}$ ，可感全部可见光；④红外片，感光范围扩大至 $1.3\mu\text{m}$ ，可感摄影红外波，但不感绿、黄光；⑤彩色片，天然彩色片和红外彩色片可分属全色片和红外片，感色性有其特殊性（图3-9，3-10）。

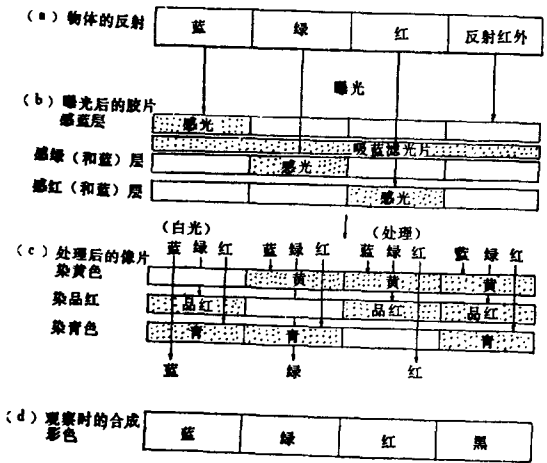


图 3-9 天然彩色片色的再现过程
(据马荣斌, 1982)

3-13)。

②数字磁带：探测系统输出的电压信号，经过模/数转换器（A/D），对电压曲线分段读数（取样与量化），记录这种数据的磁带称为数字磁带。数字磁带也是一种暂时性记录介质。

(二) 遥感器的特性参数

1. 空间分辨率

表示按地物几何特征（尺寸和形状）和空间分布，即在形态学基础上识别目标的能力。遥感器的空间分辨率有两种含义：一是遥感器的技术鉴别能力，即能把两相邻目标作为两个清晰实体记录下来的两目标间的最小距离；二是传感器观察地面特征所需要的有效探测和分析的分辨率。

2. 波谱分辨率

指传感器在接收目标辐射的波谱时，能分辨的最小波长间隔，即传感器的工作波段数目、波长及波长间隔（谱带宽度）。波谱分辨率越高，区分具有微小波谱特征差异地物的能力越强，数据量越大，数据传输、处理越困难，各波段间数据的相关性越大。因此，波

(2) 磁带

磁带是指具有磁表面的柔软带状记录介质。感光材料上记录的光像能通过光电转换记录在磁带上（图3-11），感光材料记录的影像形象直观，便于目视解译；而磁带记录的影像，数据准确适于计算机处理。

①模拟磁带：是遥感信息的暂时性记录介质。传感器探测系统输出的电压信号，每一条成像扫描线对应一条电压曲线，记录在磁带上的磁信息也是模拟电压曲线。回放时，模拟磁带复原为时序电压曲线，经电光转换成光信号，以扫描方式记录在感光胶片上（图3-12，

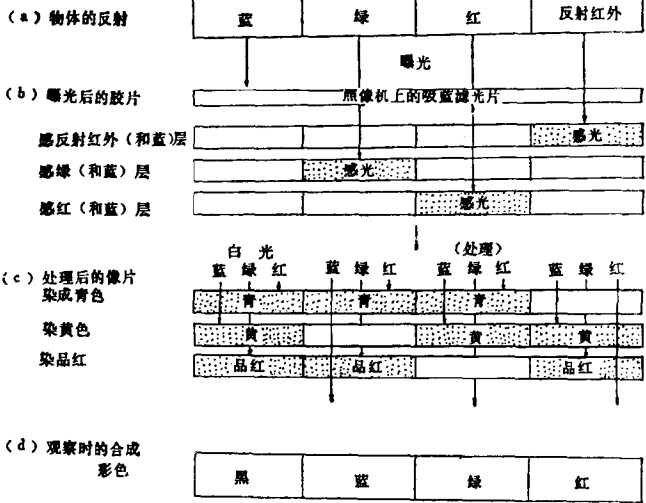


图 3-10 红外彩色片色的再现过程
(据马荣斌, 1982)

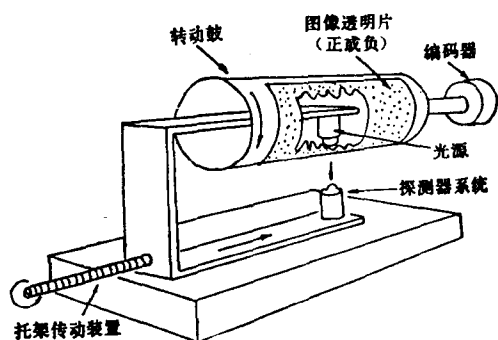


图 3-11 图像数字化系统
(据F.F.萨宾, 1981)

辐射分辨率越高, 识别两同等空间分辨率目标的能力越强。

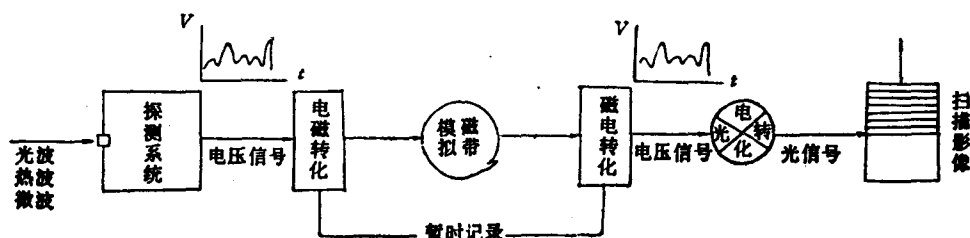


图 3-12 模拟磁带
(据马谔乃, 1984)

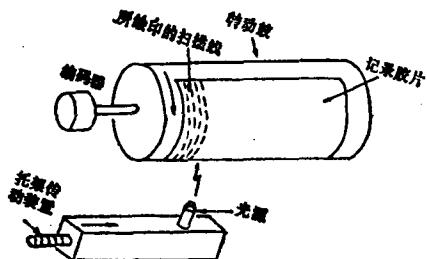


图 3-13 扫描成像仪原理
(据F.F.萨宾, 1981)

谱分辨率应服从应用目的, 结合地物特征波谱位置分析, 选择能够提供最大信息量的最佳波段和多波段组合。

3. 辐射分辨率 (辐射灵敏度)

遥感器测量的是地物的波谱辐射度。辐射分辨率指遥感器探测元件在接收波谱辐射信号时, 能分辨的最小辐射度差。也就是把遥感器输出信号的总范围, 即从黑到白, 分解成大量刚好能辨别的灰度等级。辐射分辨率反映了地物在波谱辐射度或反射率上的细微差异,

4. 时间分辨率

是遥感器成像间隔的一项性能指标。遥感器对目标的运动 (变化) 须进行连续、均匀、不间断地探测, 为分析、识别目标所必须具有的最小时间间隔, 称时间分辨率, 也就是指对同一目标遥感器重复成像的周期。时间分辨率有不同的数量级, 如静止气象卫星为0.5小时, 陆地观测卫星为几天或几周, 航空摄影或空间飞行人工摄影为几个月, 甚至几年。

(三) 遥感器的类型及成像原理

遥感器的类型, 按所探测的波谱段分为可见光、红外和微波遥感器; 按信息记录的形式分为强调空间分辨率的成像遥感器和侧重时间、波谱分辨率的非成像遥感器; 成像遥感器按成像方式可分为摄影方式和扫描方式, 其中又有单波段和多波段之分; 按探测的辐射源可分为主动式 (有源) 和被动式 (无源) 遥感器, 等等。

1. 摄影方式遥感器

摄影方式遥感器是指经过透镜 (组), 按几何光学的成像原理聚焦构像, 用感光材料, 通过光化学反应直接感测和记录目标物反射的可见光和摄影红外波段电磁辐射能, 在胶片或像纸上形成目标物固化影像的遥感器。其优点是空间分辨率高、成本低、操作易、

信息容量大；缺点是局限在 $0.3-1.3\mu\text{m}$ 波谱段，影像几何畸变较严重，成像受气候、光照条件和大气效应的限制。

典型的摄影方式遥感器是各类摄影机，按结构及胶片曝光方式可分为帧幅式、全景式和条幅式摄影机（图3-14）。

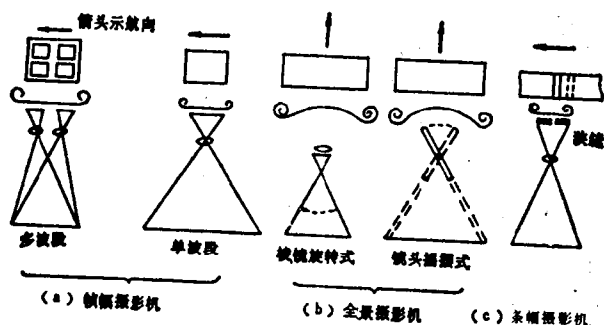


图 3-14 摄影机按结构及曝光方式的分类

（据日本遥感研究会，1981）

2. 扫描方式遥感器

摄影方式遥感器，由于胶片只能感测 $0.3-1.3\mu\text{m}$ 的电磁辐射能，且受胶片和滤光片性能的限制，只能分割成4—6个波段；摄影胶片必须回收处理，影像形成周期长，无法进行实时观测等不足之处。而扫描方式遥感器则能探测 $0.3-14\mu\text{m}$ 的从紫外波直到远红外波段，天线扫描遥感器还可探测微波；可以同时获取数个乃至数百个窄波段（ $10-100\text{nm}$ ）的多波段、超多波段数据，大大提高了波谱分辨率；输出为电信号，可用磁带记录，并能实时传输；所获得的数据是辐射量的定量数据，便于校正等多种优点。

（1）电子扫描遥感器

由扫描电子束逐次扫描经透镜在焦平面上形成的光像而成像，是映像面扫描（图3-15），如Landsat曾携带过的返束光导管摄像机（RBV）。

（2）光机扫描遥感器

光机扫描遥感器借助平台沿航向运动和本身光学机械垂直航向的横向扫描，共同完成地面覆盖，获取条带形地面影像。

①红外扫描仪：可以在整个红外波段工作，但应用较多的是 $3-5\mu\text{m}$ 波段和 $8-14\mu\text{m}$ 波段。热红外扫描仪是指对目标物自身发射的热辐射进行扫描成像的遥感器，一般由光学

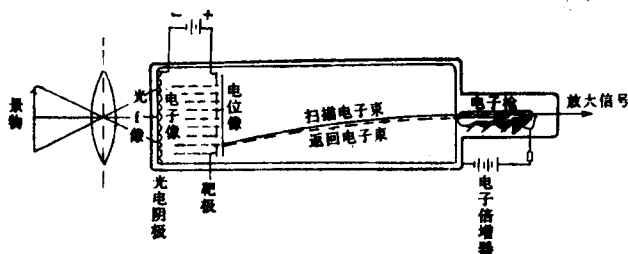


图 3-15 电子扫描成像过程

（据马萧乃，1984）

机械扫描部分、热红外探测器和影像记录部分组成(图 3-16)。

②多波段扫描仪：其成像过程与热红外扫描仪基本相同，由机械扫描和分光装置两部分组成(图3-37)。如陆地卫星多波段扫描仪(MSS)和专题成像仪(TM)。

(3) 固体自扫描遥感器

为了提高扫描遥感器的空间分辨率和探测精度，随着半导体技术的发展，80年代出现了以电荷耦合器件(CCD)为探测器的固体自扫描成像遥感器。CCD是一件用电荷量表示信号强弱，用耦合方式传递信号的全固体化半导体表面器件，其受激电荷靠电子或空穴运载在固体内移动。图3-17为线列CCD固体自扫描遥感器成像原理。线列CCD成像遥感器工作时如同扫帚扫地一般扫过航迹，故又称推扫式扫描仪。如SPOT卫星携带的高分辨率可见光遥感器(HRV)。

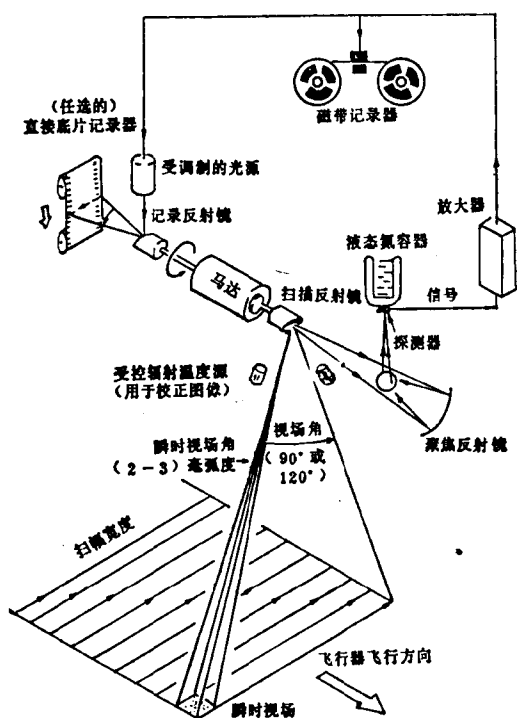


图 3-16 热红外扫描仪成像原理

(据F.F.萨宾, 1981)

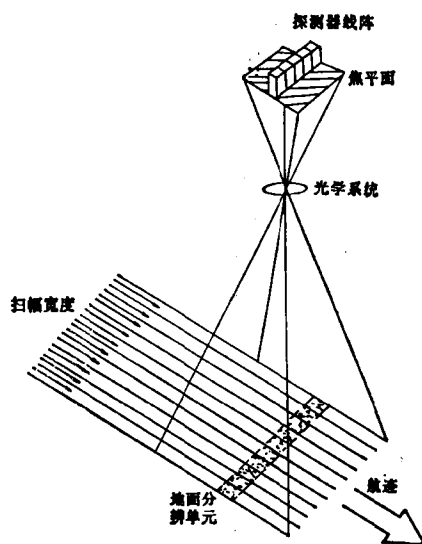


图 3-17 固体自扫描遥感器成像原理

(据F.F.Sabins, 1986)

固体自扫描遥感器一改光机扫描仪的逐点扫描为逐行扫描，还可制成CCD面阵进行逐面扫描，革除了机械部件，简化了结构，避免了因振动引起的噪声，光敏元同时露光，延长了信号驻留时间，提高了遥感器的灵敏度；波谱响应范围宽(硅光敏元可探测0.4—1.1 μm ，红外探测器InSb(3—5 μm)、HgCdTe(3—5 μm 和8—14 μm)；还具有无畸变、体积小、功耗低、寿命长、可靠性强等一系列优点，使成像遥感器的结构发生了根本性变革。

(4) 成像波谱仪

成像波谱仪是80年代发展起来的一种兼具高空间分辨率和高波谱分辨率、谱像合一的新型超多波段扫描成像遥感器(图3-18)。可以将地表反射的太阳能量经波谱仪色散，

在 $0.4\text{--}2.5\mu\text{m}$ 或更宽的波谱范围内同时获取目标物几十个,甚至几百个连续的波段很窄(10nm)、互相配准的超多波段的数据和每个像元的反射波谱曲线。目前已有实用型的线阵探测器光机扫描成像波谱仪和面阵探测器固体成像波谱仪。

(5) 天线扫描成像传感器

主要指工作在微波波段($0.8\text{--}100\text{cm}$)、有源主动、天线侧向扫描(图3-19)、能产生高分辨率影像的成像雷达。包括真实孔径侧视雷达(RA-SLR)和合成孔径侧视雷达(SA-SLR)。

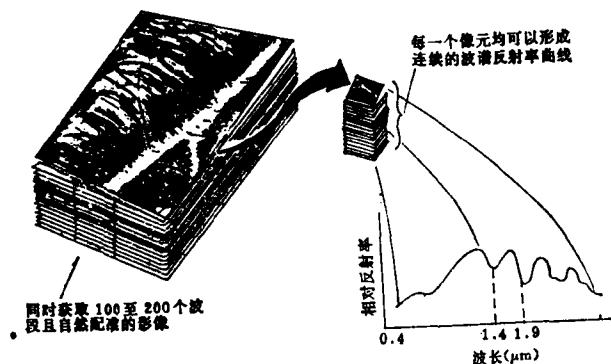


图 3-18 成像波谱概念图

(据郑兰芬, 1992)

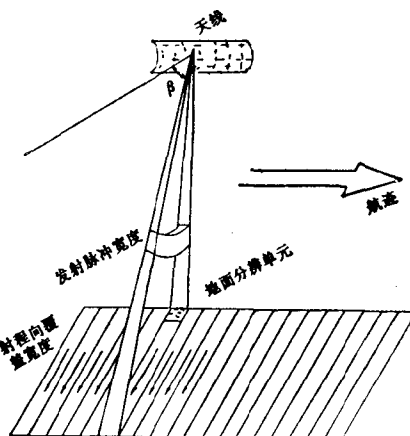


图 3-19 天线侧向扫描示意图

(据F.F.Sabins, 1986)

① 真实孔径侧视雷达

图3-20, 21示出了真实孔径侧视雷达(又称非相干雷达)的成像过程和工作原理。

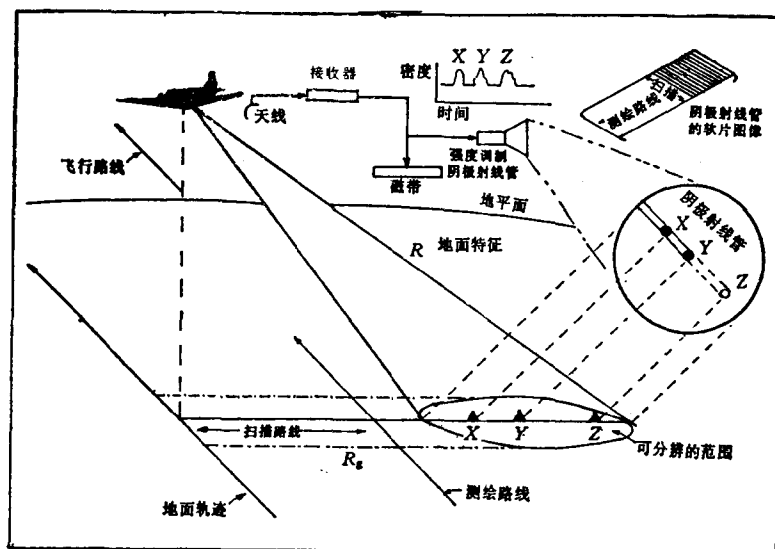


图 3-20 侧视雷达成像过程图

(据J.E.埃斯特斯, 1981)

装在平台一侧或两侧的水平孔径天线, 将发射机产生的高功率微波短脉冲, 侧向发射出去, 以窄的扇形波束扫过地面一条窄带。微波遇目标后发生反射和散射, 其中沿发射方

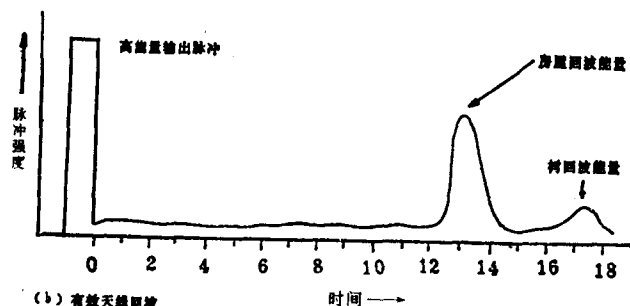
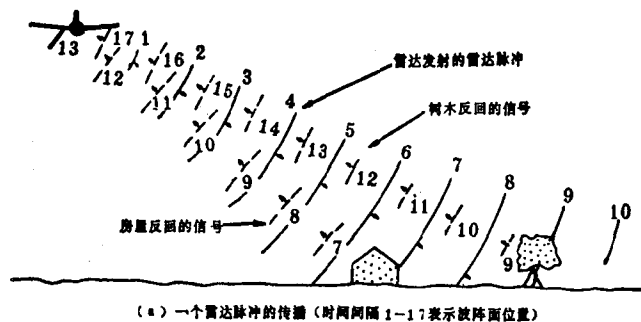


图 3-21 机载侧视雷达工作原理图

(据马荣斌, 1982)

向返回的部分称后向散射回波。天线至目标的径向距离叫斜距 (R)，从航迹到目标的水平距离叫地面距离 (R_g)。地面上窄带内的目标与天线距离不同，其回波到达接收机的时间也有先后，并与目标斜距或地面距离成比例，回波强度由阴极射线管按比例转换成光信号记录在胶片上或磁带上。

成像雷达图像的地面分辨率是指在距离方向或方位方向上能分辨有相同反射特性两个邻近目标间距的能力，或同时出现在影像上两个能够区分的目标间的最小距离，分别称为航向方向的方位向分辨率 (R_a) (图3-22) 和垂直航向的距离向分辨率 (R_r) (图3-23)，两者互不相关。

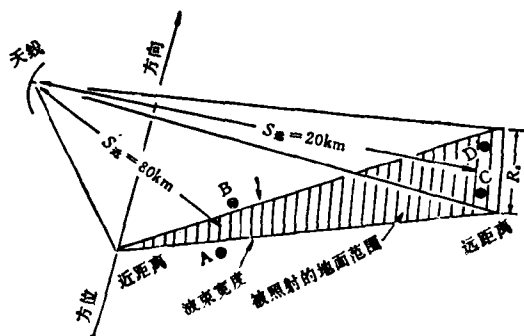


图 3-22 机载真实孔径侧视雷达的雷达波束宽度和方位方向分辨率 (R_a)

(据F.F.萨宾, 1981)

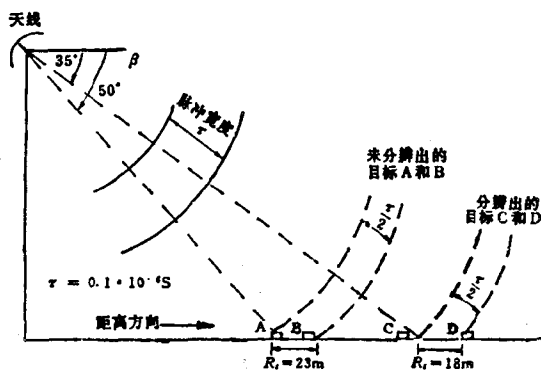


图 3-23 在距离方向上的雷达分辨率 (R_r)

(据F.F.萨宾, 1981)

侧视雷达的距离向分辨率由脉冲宽度(τ)和雷达波束俯角(β)决定 $R_r = c \cdot \frac{\pi}{2} \cdot \sec\beta$, c 为光速。提高距离向分辨率须采用脉冲压缩技术减小脉冲宽度,但脉冲宽度过窄又会造成回波能量太弱将不利用探测目标。另外,由近射程至远射程处的俯角不同,由大逐渐变小,距离向分辨率将由低逐渐增高。

侧视雷达的方位向分辨率随雷达的种类而异。真实孔径侧视雷达的 R_a 与天线孔径(D)大小成反比,与雷达工作波长(λ)及斜距(R)成正比,即 $R_a = \lambda \cdot R / D$ 。在波长一定时,要提高方位向分辨率,需加大天线孔径或缩短斜距。但要在平台上安装过长的天线是不现实的,缩短斜距又限制了雷达的作用距离。因此,真实孔径侧视雷达的方位向分辨率一般较低,也不能在轨道高度产生高分辨率雷达图像。方位向分辨率从近射程端向远射程端是逐渐下降的。为增大天线孔径(长度),根据定向线性天线阵原理,一个线性天线阵等效于一个大天线,能够形成窄的波束,而波束越窄,方向性越好,方位向分辨率越高。合成孔径侧视雷达就是模拟线性天线阵,应用多普勒效应和数据处理技术,用一个小天线合成一个大孔径,使方位向分辨率提高了几十倍至几百倍,从而实现在轨道高度获取距离向和方位向分辨率都很高的雷达图像。

②合成孔径侧视雷达

合成孔径雷达的原理如图3-24,一个长度为 D 的小天线,装在作匀速直线运动的平台上,顺序通过航迹上各点。当小天线进入位置A时,雷达波束(宽度为 γ)开始照射到目标W,在位置B雷达波束中心照射W,当距离位置C时,仍能照射到W,即在AC距离内,

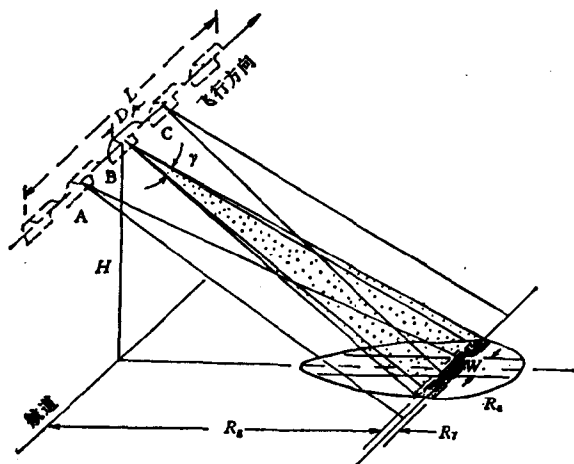


图 3-24 合成孔径侧视雷达原理及地面分辨率

(据F.F.萨宾, 1981)

目标W都能与小天线发生作用。显然,小天线阵元 D 在运动过程中就构成了一个线性天线阵,它等效于一个孔径为 L 的大天线,这就是合成孔径的直观概念。另外,与真实孔径侧视雷达不同,合成孔径侧视雷达不是对回波信号逐个单独处理,而是在连续覆盖同一目标时,先将目标回波的振幅和相位(及极化)的变化记录在胶片上,这种既有振幅信息又有相位信息的胶片称波带片(数据胶片),波带片记录的是回波的干涉或衍射图形,需经光学处理器或光学相关器等光学处理成像设备,才能形成目标物雷达影像。所以,合成孔径侧视雷达是一种两步成像遥感器(图3-25)。

合成孔径侧视雷达的方位向分辨率为 $R_a \approx D/2$,只与小天线的孔径 D 有关,而与波长和作用距离无关。

三、遥感地面接收站

遥感地面接收站是监控卫星运行,接收遥感和遥测数据,以及对信息进行数据处理和

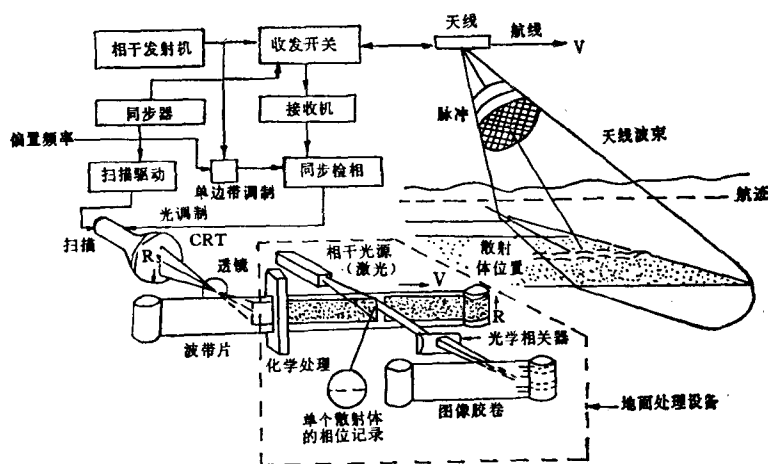


图 3-25 合成孔径侧视雷达两步成像示意图

(据中国科学院遥感技术组, 1979)

贮存的地面设施。到1986年, 世界范围已建立了25个遥感地面接收站。中国科学院遥感卫星地面站于1986年6月1日投入运行, 工作半径2400km, 任务是接收、处理、存档和分发各种遥感卫星数据。

四、遥感信息的传输

遥感平台上传感器所收集的信息只有准确、及时地送回地面并迅速进行处理, 才能加以利用。遥感信息向地面传输一般采用以下两种方式:

(一) 直接回收

这是遥感信息传输的初级形式, 是在遥感平台返回地面后, 直接回收传感器输出的磁带或胶片, 如飞机、航天飞机等; 或由遥感平台按地面指令使再入舱与仪器舱分离, 独立返回地面, 然后从再入舱内取出磁带或胶片, 如国土卫星等。直接回收比较容易, 利于保密, 但不能实时传输。

(二) 视频数据传输

视频数据传输是将传感器收集的目标物信息, 用无线电发往地面接收站, 它是将探测器输出的视频数据, 通过通信设备, 以S波段(2000—4000MHz) 15Mbps的数据率、X波段(8000—12500MHz) 85Mbps的数据率或Ku波段(12500—18000MHz) 等视频信道向地面发送。

视频数据可以在地面接收站视野内或经跟踪和数据中继卫星(TDRS)、国内通信卫星(DOMSAT)在地面接收站视距作用范围以外区域, 进行实时或近实时传输(图3-26); 也可以先将数据暂时记录在平台上的宽带视频磁带机(WBVTR), 待平台飞越地面站上空时再向地面传送, 称为非实时(延时)传输。

五、遥感图像的种类

由地物反射或自身发射的电磁辐射, 通过成像系统处理后产生与原物相似的形象称影像, 特点是可以点对点地表现物体, 即只有在某一视场角内的物体才能在影像平面上以点

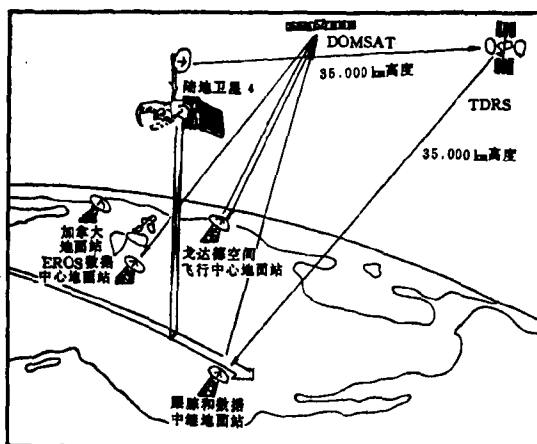


图 3-26 视频数据近实时传输

(据美国地质调查局, 1987, 略改)

的形式显示, 且每一物点的辐射能只能投射到影像平面的相应点上。不管是可见光还是不可见波都可以形成直观影像, 记录存贮在感光材料或在显示器上显示, 也可以以数字数据的潜像形式记录存贮在磁带上。通过安装在遥感平台上的传感器对地球表面摄影或扫描获得的影像称遥感影像。遥感影像经过处理或再编码后产生的与原物相似的形象称遥感图像。为区别不同成像方式的遥感影像, 常称光学摄影成像的二维连续的影像为像片、扫描成像的一维连续一维离散或二维离散的影像为图像。在遥感

应用中有按遥感平台类型分称航天、航空、地面遥感图像; 按影像记录的电磁波波段分为紫外、可见光、近红外、热红外、微波图像和多波段、超多波段图像; 按影像比例尺有大中、小比例尺图像。遥感影像还有彩色和黑白, 彩色图像又有真彩色和假彩色之分, 等等。

遥感地质中常用的按成像传感器工作波段和成像方式进行的遥感图像分类, 既能体现影像特征, 又能揭示影像的信息内涵 (表3-2)。

表 3-2 按成像传感器成像方式和工作波段的遥感图像分类表

成 像 方 式		工 作 波 段	实 例
光 学 摄 影 影 片	常规摄影像片	黑白全色像片 (可见光) 天然彩色像片 (可见光)	航空像片 航天像片
	非常规摄影像片	黑白红外像片 (近红外) 彩色红外像片 (近红外) 紫外像片 (紫外) 多波段像片 (紫外-近红外) 全景像片 (可见光-近红外)	
扫 描 图 像	电子扫描图像	电视摄像图像 (可见光)	RBV图像
	光机扫描图像	红外扫描图像 (中、远红外) 多波段扫描图像 (紫外-远红外) 超多波段扫描图像 (可见光-近红外)	热红外图像 MSS、TM图像 成像波谱仪图像
	固体自扫描图像	固体自扫描图像 (可见光-近红外)	HRV图像
	天线扫描图像	成像雷达图像 (微波)	合成孔径雷达图像 (SAR)

六、遥感图像的基本属性

遥感图像的波谱特性、空间特性、时间特性等基本属性, 是遥感地质学的一项重要研究内容。

(一) 波谱特性

从波谱学方面, 根据传感器探测记录的波谱特性差异识别地物和现象, 是遥感应用的基本出发点。波谱特性差异在遥感图像上即为影像灰度 (色调) 或色彩的差异。各种遥感

图像的灰度或色彩都是其响应波段内电磁辐射能量大小的反映；黑白全色像片、天然彩色像片反映地物对可见光（ $0.38-0.76\mu\text{m}$ ）的反射能量；黑白红外像片、彩色红外像片反映的是地物在部分可见光和摄影红外波段（ $0.38-1.3\mu\text{m}$ ）的反射能量；热红外图像反映地物在热红外波段（ $8-14\mu\text{m}$ ）的热辐射能量（辐射温度）；成像雷达图像反映地物对人工发射微波（ $0.8-100\text{cm}$ ）后向散射回波的强弱；多波段、超多波段图像灰度则是其各自响应波段辐射能量大小的反映。遥感图像波谱特性分析，包括遥感器的波谱分辨率和辐射分辨率。

（二）空间特性（几何特性）

遥感图像的空间特性，是从形态学方面识别地物、测绘地图、建立解释标志、图像几何纠正及增强处理等的重要依据。遥感图像空间特性分析，主要有成像遥感器的空间分辨率、图像投影性质、比例尺、几何畸变等。

1. 空间分辨率

遥感图像的空间分辨率指图像能分辨具有不同反差、相距一定距离相邻目标的能力。

（1）影像分辨率：指用显微镜观察影像时， 1mm 宽度内所能分辨出的相间排列的黑白线对数（线对/ mm ）。它受光学系统分辨率、感光材料（或显示器）分辨率、影像比例尺、相邻地物间的反差等因素的综合影响。

（2）地面分辨率：指遥感影像上能分辨的两个地物间的最小距离。扫描影像常用遥感器探测单元的临时视场大小表示，如陆地卫星MSS图像的地面分辨率为 80m 。

2. 影像比例尺

指影像上某一线段的长度与地面上相应的水平距离的比值。由遥感器光学系统的焦距（ f ）与遥感平台的高度即航高（ H ）之比来确定，即 $1/m = f/H$ （图3-27）。由于遥感影像一般为中心投影或多中心投影，它不同于地图的垂直投影，影像比例尺受地形起伏及地物在像幅中位置的影响，会出现各处不一致的现象。

3. 投影性质与影像几何畸变

遥感影像均经光学系统聚焦成像，透镜的成像规律和遥感器成像方式决定了遥感影像的投影性质。不同投影性质会产生不同性质的影像几何畸变。

（1）中心投影：如图3-27，地面上各地物点的投影光线（ Aa 、 Bb 、 Cc ）都通过一个固定点（ S ），投射到投影面（ P_1 、 P_2 ）上形成的透视影像称中心投影， S 称投影中心（透镜中心）。帧幅摄影像片即为地面的中心投影。投影中心位于投影面与地物之间时，投影面（ P_1 ）上的透视影像称负像， P_1 称负片（底片）；在投影中心与地物之间的投影面（ P_2 ）上的影像称正像， P_2 又称正片（像片）。航空摄影机主光轴与像平面的交点称像主点；过投影中心的铅垂线与像平面的交点称像底点。

（2）一维中心投影 条幅摄影机影像在沿缝隙方向属中心投影，当地面平坦且投影面水平时，影像比例尺等于 f/H ，但在航向方向，比例关系则由卷片速度 v 与航速 V 之比来确定，因此影像的纵向和横向比例尺通常不一致。全景摄影影像，在扫描角活动时也属一维中心投影，会产生全景畸变（见全景像片特性）。

（3）多中心投影：光机扫描影像为逐点行式扫描成像，每个像点都有各自的投影中心，但同一条扫描线上各像点成像时间相差甚小，可以认为每一扫描行有一个投影中心，故光机（固体）扫描影像为多中心投影（图3-16）。

(4) 旋转斜距投影：如图3-28，为侧视雷达对平坦地面成像时的几何关系， Sab 为影像面， ab 是在阴极射线管屏幕上光点掠过的轨迹，光点出现的时间取决于雷达发出微波到接收到回波间的时间间隔，由于微波传播速度(c)是固定的，所以雷达影像实际为斜距的投影，投影性质为旋转斜距投影。

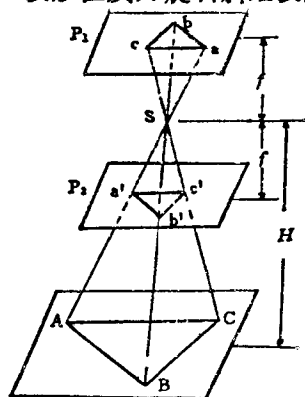


图 3-27 中心投影
(据李永颐, 1990, 略改)

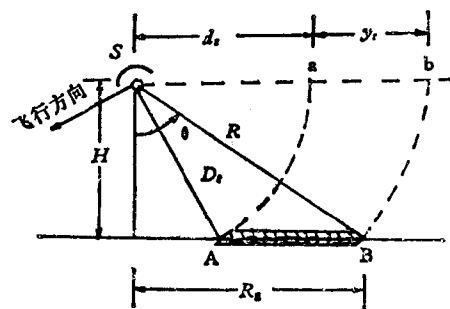


图 3-28 旋转斜距投影
(据华瑞林, 1990, 略改)

(三) 时间特性

遥感影像是成像瞬间地物电磁辐射能量的记录，而地物都具有时相变化，一是自然变化过程，即其发生、发展和演化过程；二是节律，即事物的发展在时间序列上表现出某种周期性重复的规律，亦即地物的波谱特性随时间的变化而变化。在遥感影像解译时，必须考虑研究对象所处的时态，充分利用多时相影像，不能以一个瞬时信息来包罗它的整个发展过程。遥感影像的时间特性与遥感器的时间分辨率有关，还与成像季节、时间有关。

第二节、光学摄影像片特性

一、帧幅式摄影像片特性

(一) 帧幅式航空像片的种类

常见的航空像片多为帧幅式，系航空摄影获取的反映地面特征的影像像片。航空摄影指运用安装在航空平台上的航空摄影机，对地面进行光学成像，用感光胶片直接记录地物反射的 $0.3-1.3\mu\text{m}$ 波段电磁波，并取得像片的整个过程。现代遥感技术已进入空间时代，上述概念已扩展到包括从外层空间对地球、月球和太阳系其它星球进行光学摄影而获取的各类帧幅摄影像片。

航空摄影机主光轴与铅垂线夹角小于 3° 的垂直航空摄影获取的航空像片称水平航空像片；夹角大于 3° 的倾斜航空摄影获取的为倾斜航空像片。按工作波段和所使用的胶片，航空像片可分为全色黑白、天然彩色、红外黑白、红外彩色、多波段航空像片等。

(二) 帧幅式航空像片的地面覆盖与影像重叠

航空摄影主要是为地形测绘、资源及环境调查提供基本资料，需对测区进行面积覆盖，为此进行的航空摄影称面积航空摄影。如图3-29，面积航空摄影由许多条平行直线性航线组成。为保证连续覆盖和像对立体观察，相邻像片间需要有部分影像重叠，沿航线方向的

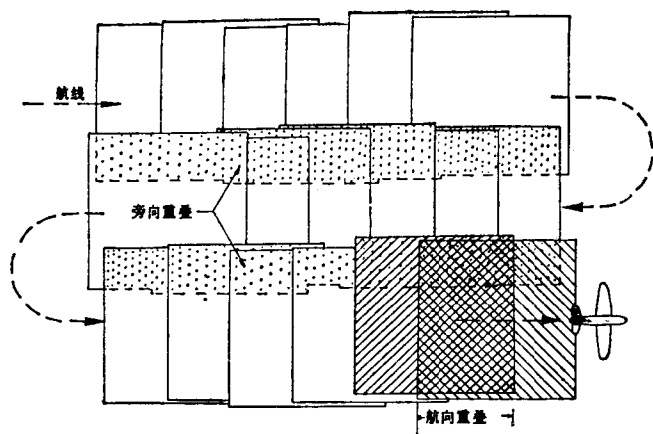


图 3-29 面积航空摄影的地面覆盖

(据T.M.Lillesand, 1979, 略改)

称航向重叠，重叠率要求达到60%或不少于53%，具有这种重叠关系的两张相邻像片称立体像对；两条相邻航线间的影像重叠称旁向重叠，重叠率通常为20%—30%。地形起伏强烈，重叠率相应要加大。

(三) 帧幅式航空像片的
空间特性

1. 投影性质及比例尺

帧幅航空像片是地面的中心投影，受地面起伏和像片倾斜的影响，像片上各处影像比例尺会不一致。平坦地面的水平航空像片，影像比例尺处处一致，且与线段的方向及长短无关，为 $1/m = f/H$ ，航高一定，焦距越长，影像比例尺越大，地面覆盖范围越小（图3-30）；焦距一定，航高越大，影像比例尺越小，地面覆盖范围越大（图3-31）。在地形起伏地区，由于各影像点相对航高不一致，不同高程处的地物影像比例尺不同（图3-32），高差越大，相对航高差越大，比例尺差别越大，只有在同一高程上的地物，影像比例尺才相同。因此，地形起伏地区的航空像片比例尺只能概略表示。航摄技术鉴定书提供的航高为航测高差仪记录的像底点的航高，用此航高计算的比例尺称主比例尺，通常以主比例尺代表像片比例尺。

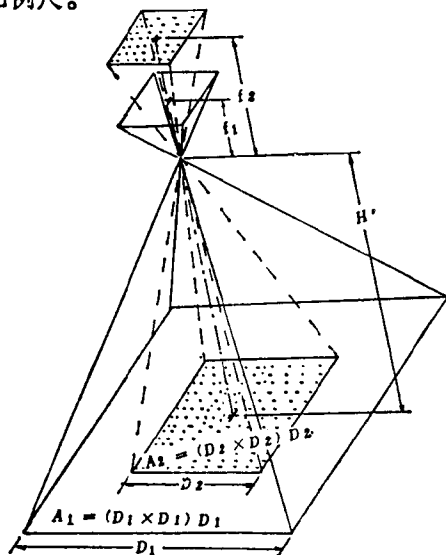


图 3-30 焦距对地面覆盖范围的影响

(据T.M.Lillesand, 1979)

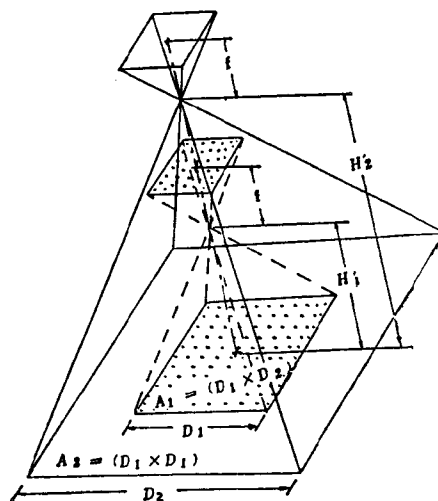


图 3-31 航高对地面覆盖范围的影响

(据T.M.Lillesand, 1979)

2. 地形起伏引起的像点位移与影像畸变

根据中心投影的原理，由于地形起伏，任何高于或低于基准面的地面点投影在水平像

片上的像点，相对于在基准面上垂直投影的像点，都有位置移动。由中心投影造成，在地面上平面坐标相同但高程不同的点，在像片面上的像点坐标不同，这种像点位置的移动，称像点位移（投影差）（图3-33）。

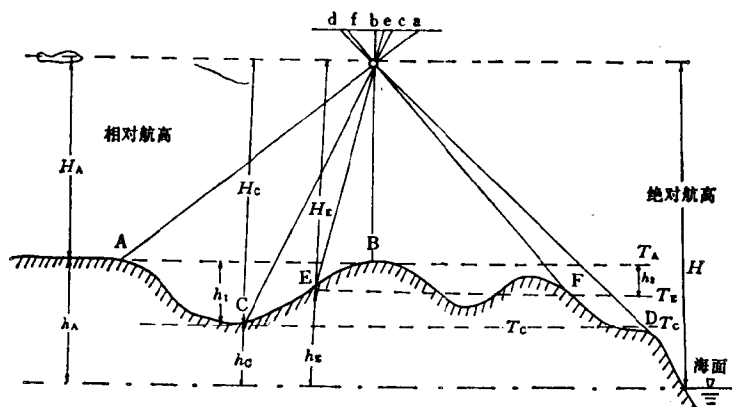


图 3-32 地形起伏对像片比例尺的影响

（据朱亮璞，1981）

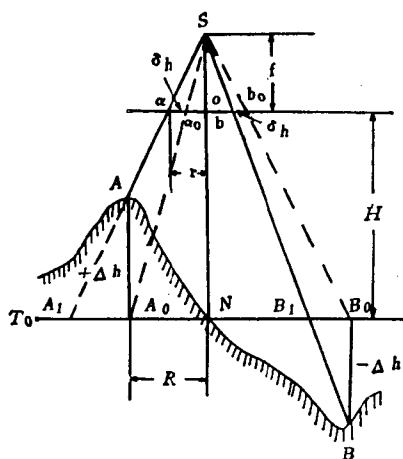


图 3-33 因地形起伏引起的像点位移

（据马荣斌，1982）

如图3-33， T_0 为基准面（地底点N所在的水平面），A点高于 T_0 ，高差为 Δh ， A_0 为A在 T_0 上的垂直投影， a, a_0 为A、 A_0 在像片上的像点，线段 aa_0 则为A点与 T_0 高差在像平面上的像点位移（ δh ）；同理 bb_0 为低于 T_0 的B点在像平面上的像点位移（ $-\delta h$ ）。根据相似三角形对应边成比例，导出像点位移量（ δh ）的计算公式： $\delta h = \pm \Delta h \cdot r/H$ ，式中 r 是像点至像底（主）点的距离，称向径； H 为航高； Δh 为地面点与 T_0 的高差，高于 T_0 时取“+”，低于 T_0 时取“-”。

根据上式，像点位移的规律是：① δh 与 r 成正比。像点距像底（主）点越远，像点位移量越大，像幅中心部分像点位移量小，像底（主）点处 $r=0$ ，为唯一没有像点位移的点；② δh 与 Δh 成正比。高差越大，像点位移量越大，像点位移发生在以像底（主）点为中心的辐射线，即像点与像底（主）点的连线上，当 Δh 为正值时， δh 为正值，像点背离像底（主）点向外移动（ $a_0 \rightarrow a$ ），当 Δh 为负值时， δh 为负值，像点朝向像底（主）点方向移动（ $b_0 \rightarrow b$ ）；③ δh 与 H 成反比。航高越大，像点位移量越小。

3. 空间分辨率

航空像片影像分辨率一般在25—100线对/mm。地面分辨率与影像分辨率和比例尺有关，三者关系为：

$$\text{地面分辨率 (m)} = \frac{\text{航空像片比例尺的分母}}{\text{影像分辨率 (线对/mm)} \times 1000 (\text{mm/线对} \cdot \text{m})} \quad (3-1)$$

例如，一幅1：50000的航空像片，影像分辨率为40线对/mm，则其地面分辨为 $50000/40 \times 1000 = 1.25 (m)$ 。

4. 立体观察

遥感图像的立体观察是目视解译的一种重要手段。在满足立体观察条件时，可以将二维影像转化为三维空间的立体光学模型，从而突出了地物的空间特性，使人眼易于辨认地物和确定空间位置。

人的双眼具有天然的立体视觉。如图3-34，在双眼前各放一块透明的玻璃片 P_1 、 P_2 ，透过 P_1 、 P_2 会看到后面具有立体感的景物。假设观察到的景物影像能够保留在 P_1 、 P_2 上（如同像片），然后将景物移走，根据光的可逆性，仍会看到景物的空间形状，但此时已不是实际景物的立体形象，而是一种人造立体—人工模拟光学立体模型。利用立体镜等仪器观察如 P_1 、 P_2 放置的航空像片立体像对便可以观察到这种立体模型。

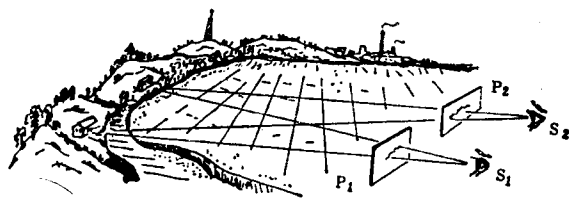


图 3-34 人造立体视觉原理
(据盛浩然, 1979)

(四) 航空像片的波谱特性

各种航空像片都是以色调或色彩以及由它们组合成的形态特征反映地物反射的 $0.3-1.3\mu m$ 波段的电磁波信息，因此，影像色调或色彩是地物反射波谱特性的显示，是从波谱学识别地物的重要解译标志。

色调指黑白像片上影像黑白深浅的程度，是地物反射的电磁波与感光胶片产生光化学反应的记录。不同地物反射波谱特性不同，在像片上呈现为不同的色调，一般在胶片感光波段或多波段的相应通道反射率高的物体，色调浅；反射率低的物体，色调深，即地物影像色调的深浅与胶片的感色性有关。色调差别用灰阶(或灰度)表示，从白到黑分为白、灰白、淡灰、浅灰、灰、暗灰、深灰、淡黑、浅黑、黑十级。

黑白全色像片，消色物体影像色调与物体本色一致或接近；彩色物体影像色调与物体原色有一定的对应关系(表3-3)。

表 3-3 黑白全色像片彩色地物原色与影像色调对应关系

彩色地质体颜色	全色黑白像片上的色调	
	灰 阶	标准色调
淡黄	(1)	(白)
黄、黄褐	2	灰白
深黄、橙黄、淡红、浅蓝	3	淡灰
红、蓝	4	浅灰
深红、紫红、淡绿、深蓝	5	灰
绿、紫	6	暗灰
深绿	7	深灰
墨绿	8	淡黑
	9	浅黑
	(10)	(黑)

(据朱亮璞, 1981)

黑白红外像片影像色调深浅取决于地物对近红外波的反射强度，与人眼对物体的感受无关。健康植物，特别是阔叶树，对近红外波反射强度大，呈明亮的浅色调。水体因强烈吸收近红外波而呈暗(黑)色调。

多波段黑白像片影像色调，主要取决于地物对多波段航空摄影机各通道相应波段电磁波的反射强度。这对彩色物体尤为重要，如在 $0.6-0.7\mu m$ 通道，褐红色土壤或岩石主要反射 $0.6-0.7\mu m$ 的橙红光，影像呈浅色调；而植物对此波段的光反射很弱，影像为暗色调。

天然彩色像片记录地物选择性反射的可见光，影像色彩与地物原色基本一致，故又称真彩色像片。影像色彩丰富、立体感强、直

观、逼真，不同颜色地物一目了然。

彩色红外像片影像色彩是象征性的，由其胶片结构知，它不记录蓝光，地物反射的绿光、红光、近红外波分别记录成蓝色、绿色和红色（图3-10），所以是一种假彩色像片，影像色彩与地物原色不同（图版18）。如反射绿光且强烈反射近红外波的绿色植物，其彩色红外影像为品红色。彩色红外影像与地物原色的对比关系见表3-4。由于它所记录的地物波谱向长波方向推移，与天然彩色影像相比，受大气影响较小，影像色彩饱和度较高，色彩更鲜艳，层次更清楚。

表 3-4 彩色红外影像色彩与地质颜色的对比

地 物 颜 色		红	绿	蓝	青	品红	黄	灰-(白)
彩色红外影像色彩	强烈吸收近红外波地物	绿	蓝	灰-黑	蓝	绿	青	青
	强烈反射近红外波地物	黄	品红	红	品红	黄	灰-白	灰-(白)

（据李永颐，1991）

（五）帧幅式航空像片影像质量评定

地质解译使用的航空像片，除对航空摄影测量要求的航向重叠不小于53%、旁向重叠不小于15%、像片倾斜小于3°、航偏角小于6°和航线呈直线等进行评定外，还应对其影像质量进行评定。黑白航空像片影像应该清晰、黑度适中、反差正常、色调层次丰富、色调均匀、没有黑斑和云影、更不应有伤痕。彩色航空像片则应色别清晰、色差正常、地物各部分明度变化明显、色彩丰富、饱和度较高。此外，应能识别与地物无关的影像，如静电放射造成的树枝状花纹、指纹、显影造成的气泡、灰尘造成的白色斑点及定影不合适造成的黑度不均匀等现象。影像质量的检查评定，通常是根据经验或借助标准像片对比鉴别。

二、全景式摄影像片特性

全景像片由于扫描缝隙只允许透镜中心视场的光在胶片上曝光，影像分辨率极高（原始底片超过100线对/mm），整幅影像光强相同，但两侧边缘几何畸变较大，畸变特征也与帧幅像片有很大不同，地物影像几何形状严重失真。

（一）全景像片的空间特性

1. 投影性质与影像畸变

由图3-14（b），全景摄影机棱镜每转动一周（或镜头摇摆一次），缝隙快门从一侧地平线扫到另一侧地平线，则在每一瞬时扫描角时的全景影像沿缝隙方向为一维中心投影。

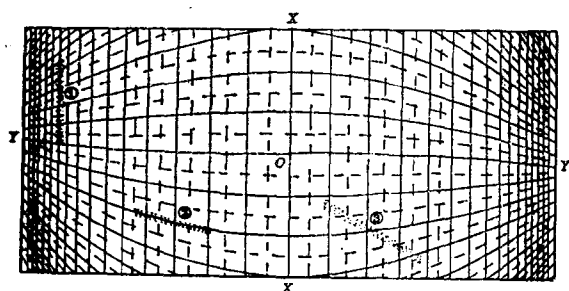


图 3-35 垂直全景像片的综合畸变影像

（据中国人民解放军空军司令部，1974）

①平行线型线段；②子午线型线段；③对角线型线段

全景像片中部相当于水平像片，两侧相当于倾斜像片，含有几种帧幅像片所没有的影像畸变，如全景畸变、扫描位置畸变和像移补偿畸变，其综合影响使地面上正方形网格畸变成图3-35所示的影像。

2. 比例尺

由全景像片的畸变特征，与航向（缝隙）xx平行的各条横线间的比例尺是不同的，但每条横线上各点的比例尺

相等。位于航迹上的主横线比例尺最大，两侧横线的比例尺则对称地逐渐缩小。在与航向垂直的纵线（ yy 方向）上各点比例尺均不相等，也是对称地由航迹向两侧逐渐缩小。

3. 地面分辨率

全景摄影机尽管焦距不变，航高一定，但斜距随扫描角变化，相当于航高发生变化，所以全景像片不同扫描角处的影像地面分辨率不同，覆盖的地面面积不同。

4. 地面覆盖

全景像片的地面覆盖，在垂直航迹方向，由缝隙扫描覆盖地面一个条带，在航向则靠平台运行来完成地面覆盖（图3-36）。

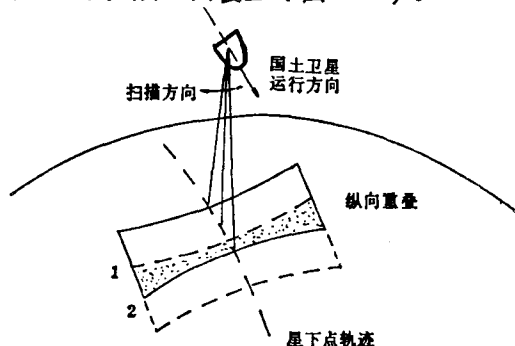


图 3-36 国土卫星全景像片的地面覆盖
（据华瑞林，1990）

（二）全景像片的波谱特性

全景像片的波谱特性，取决于成像时所用的胶片类型和特性。如国土卫星地物像机使用的胶片，一种是黑白全色胶片（感光范围 $0.4-0.7\mu\text{m}$ ），一种是彩色红外反转胶片（感光范围 $0.5-0.8\mu\text{m}$ ），其色调（彩）特征分别与全色黑白、彩色红外航空像片相似。

第三节 光机扫描图像特性

光机扫描传感器的基本特点是使用分立式多元探测器阵列，用光学机械扫描的方法对地球表面进行覆盖，图像不是同时获取而是在运动状态下成像。陆地卫星MSS图像（图版23）、TM图像（图版7，12），热红外扫描图像均为光机扫描图像，它们的成像几何特性相似，但波谱特性差异较大。

一、光机扫描图像的空间特性

（一）地面覆盖与图像重叠

如图3-37，光机扫描图像为以星下点轨迹为中心的连续扫描线组成的时序条带影像。所覆盖的地面称观测带，观测带的地面覆盖宽度称扫描宽度（ L ），即扫描线长度。以覆盖轨道（如太阳同步轨道）运行的陆地卫星，在运行一定圈数后，观测带在一定纬度范围内，以一定的旁向重叠毗连成片，构成观测区，直至覆盖全球。完成一次全球覆盖所需的圈数（观测带数）称覆盖圈数，所需的天数称覆盖周期。

陆地卫星以 185km 扫描宽度的观测带覆盖全球一次的飞行行径（相邻观测带的衔接方式）称覆盖模式。由图3-38，表3-1，Landsat 1, 2, 3轨道周期为 103.2 分钟，此间地球自转 25.8° ，每天绕地球运行 14 圈，在赤道处同天的两相邻轨道间距为 2875km ，毗邻轨道观测带重叠 14% ，星下点轨迹相距 159km ，每 2875km 的同天相邻轨道间距需 18 个观测带充满，即覆盖周期为 18 天，覆盖圈数为 251 圈，相邻观测带为隔天毗连（图3-39）。

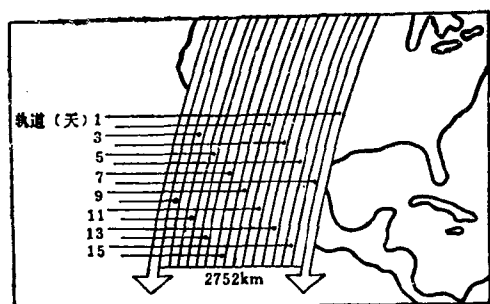


图 3-40 Landsat 4, 5地面覆盖模式
(据美国地质调查局, 1987)

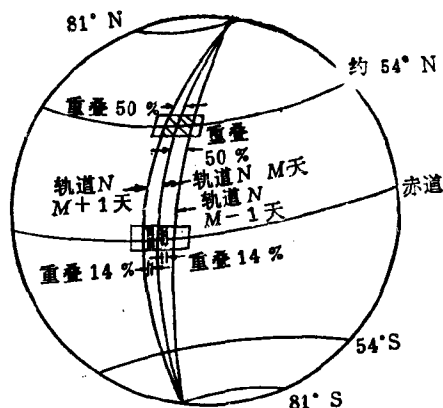


图 3-41 陆地卫星1, 2, 3的旁向重叠
(据阎守崑, 1980)

表 3-5 陆地卫星的旁向重叠率(%)

纬度	0°	10°	20°	30°	40°	50°	60°	70°	80°
陆地卫星									
1,2,3	14.0	15.4	19.1	25.6	34.1	44.8	57.0	70.6	85.0
4,5	7.3	8.7	12.9	19.7	29.0	40.4	53.6	68.3	83.9

信息。在73.42ms的扫描周期内, 卫星以6.456km/s的速度前进474m, 开始下一次有效扫描, 完成同一观测带上连续地面覆盖。一幅 $185 \times 185 \text{ km}^2$ 的MSS标准像幅影像由2340条扫描线组成, 需进行390次有效扫描。

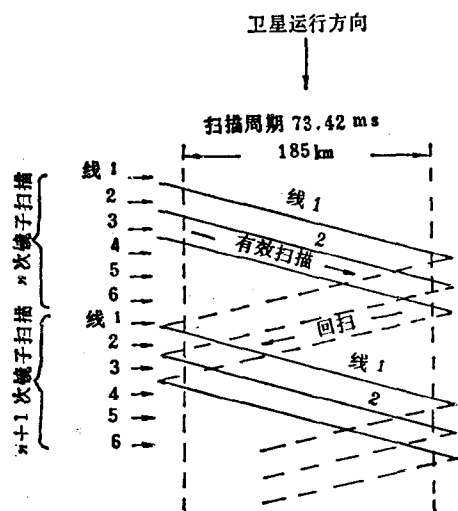


图 3-42 MSS同一观测带的地面覆盖
(据阎守崑, 1980)

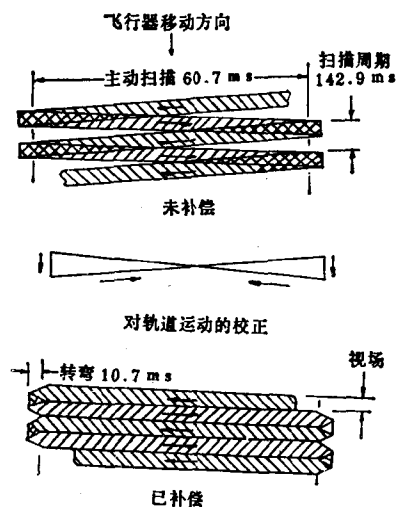


图 3-43 TM的扫描行校正
(据美国地质调查局, 1987)

TM的观测带地面覆盖采用双向扫描。即扫描镜前扫和回扫均为有效扫描(图3-43), 扫描镜摆动频率降为7次/s, 增加了探测器对地面的驻留时间, 提高了辐射测量精度。每次扫描, TM_{1-6} 和 TM_7 为16条扫描线, 线宽30m, 覆盖地面面积为 $185 \text{ km} \times 480 \text{ m}$, 一幅

185×185km²的标准像幅共有6166条扫描线。在同样的地面范围TM₀为每次扫描4条扫描线，线宽120m，标准像幅TM₀图像由1542条扫描线组成。

(二) 瞬时视场与图像像元

1. 瞬时视场、地面分辨率与比例尺

由图3-37，MSS扫描镜每次有效扫描，474m宽的地面信息投射到成像板六个不同的单元上，相当于6条79m宽的扫描线，每条扫描线对应四个波段的探测器单元，产生MSS_{1,2,3,4}四个波段影像，成像板共有24个探测器单元（若有MSS₅则增加2个热红外探测器单元，共有26个），同时形成24个影像。每个探测器单元对应的地面面积，为每根光导纤维70.9×70.9μm²的截面积对应的地面面积，即瞬时视场79×79m²，这也就是MSS影像的地面分辨率（MSS₃为240×240m²）。

TM则同时形成100个影像，即成像板由100个探测器单元组成，每次扫描的16条扫描线，每条有TM_{1-5,7}六个波段，需96个探测器单元，瞬时视场为30×30m²，另有TM6的4条扫描线，需4个热红外探测器单元，瞬时视场为120×120m²。

光机扫描传感器的瞬时视场，实际是扫描镜在某一位置时，反射到探测器单元上的那一束光线的立体角（称瞬时视场角）所包含的地面面积。一台光机扫描传感器的瞬时视场角是固定的，但瞬时视场的大小则取决于平台高度和扫描度的大小，如图3-44，若设D_纵、D_横分别为沿航向和扫描方向瞬时视场的长度，则： $D_{纵} = H \cdot \beta \cdot \sec \theta / 2$ ； $D_{横} = H \cdot \beta \cdot \sec^2 \theta / 2$ ；H为平台高度，β为瞬时视场角，θ/2为半扫描角。可见，同一条扫描线上地面分辨率随像点的位置不同而变化，在像底点处（θ=0）最高，且D_纵=D_横=D₀，其它位置的地面分辨率由中间向两侧对称地降低，且D_纵≠D_横。同一条带影像，纵、横向比例尺不一致，横向扫描线上比例尺也不一致，但纵向比例尺是一致的（图3-45）。这是在扫描覆盖时，为保证中间部分各扫描线正好衔接，造成从中间向两侧重叠部分逐渐增加。而横向比例尺，除中间与纵向比例尺相等外，随扫描角的变化，向两侧将逐渐缩小。纵、横

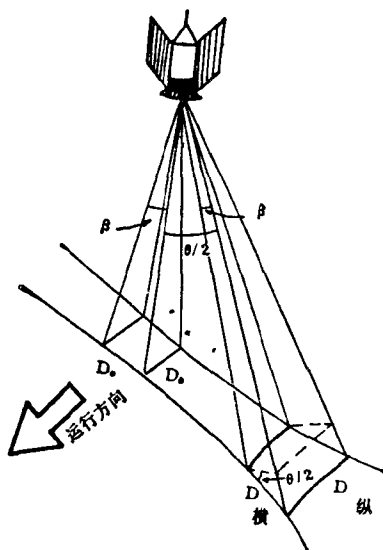


图 3-44 光机扫描图像地面分辨率
(据潘时祥, 1990)

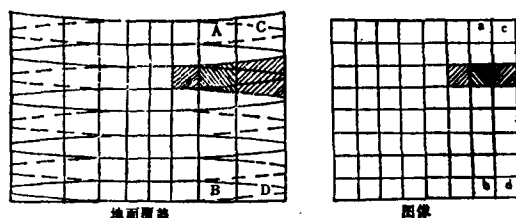


图 3-45 光机扫描图像比例尺示意图
(据潘时祥, 1990)

向比例尺的不一致是光机扫描图像影像畸变的主要原因。

2. 像元的形成与图像数字化

光机扫描图像的影像由象元组成。如MSS，以 $79 \times 79 \text{m}^2$ 的瞬时视场在扫描线上连续移动，瞬时视场中地物反射的辐射量随着扫描而连续变化，这一连续变化的辐射量被探测器单元接收并转换为连续变化的电信号，电信号为模拟信号，对其按一定的规则间隔取样和量化，便形成影像的基本单元—像元及数字数据（DN值）。数字数据的每个数值（DN值）相当于一个亮度或灰度等级，一般 $DN = 2^n$ ， $n = 6, 7, 8$ 。由图3-46，MSS的地面扫描速度为 $5.612 \text{m}/\mu\text{s}$ ，取样周期为 $9.958 \mu\text{s}$ ，即每次取样，瞬时视场由西向东移动 $5.612 \text{m}/\text{s} \times 9.958 \mu\text{s} = 56 \text{m}$ （实际工作中取 57m ），即取样间隔为 57m ，相当于在还未完全通过前一个瞬时机场的地面覆盖时，便开始了第二次取样，取样时瞬时视场仍为 $79 \times 79 \text{m}^2$ ，显然，每次取样其数据包含了前一个瞬时视场东侧 $79 \times 22 \text{m}^2$ 的信息，而只有 $79 \times 57 \text{m}^2$ 面积的新信息，两次取样间有 $79 \times 22 \text{m}^2$ 的信息重叠。所以，MSS像元对应的地面面积为 $79 \times 57 \text{m}^2$ ，反映的却是 $79 \times 79 \text{m}^2$ 地面范围内地物的综合电磁辐射信息。因此，MSS4-7每条 185km 的扫描线由3240个像元组成。一个像元内若只有一种地物称为正像元，若有两种或两种以上地物则称混合像元（综合像元）。

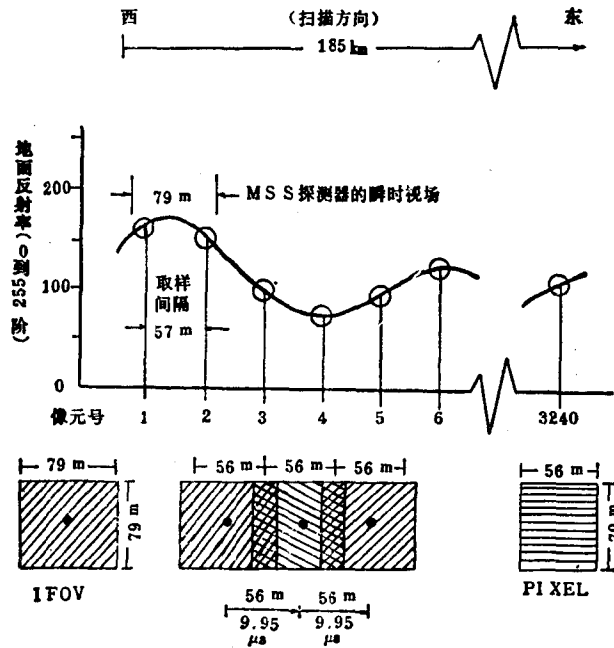


图 3-46 MSS像元的形成

（据F.F. 萨宾，1981，华瑞林，1990）

（三）投影性质

光机扫描图像，每次有效扫描具有一个投影中心，为多中心投影，如一幅标准像幅MSS图像需要390次有效扫描，具有390个投影中心。多中心投影图像也存在地形起伏引起的像点位移，高于或低于基准面的地物影像沿扫描方向发生移动，位移量与航高、地物高差和扫描距离有关，相邻观测带的重叠影像可以构成立体像对。当成像高度很大，总扫描角又很小时，像点位移量很小，此时可以把光机扫描图像，如在轨道高度成像的MSS和

TM图像,看做垂直投影。

(四) 地球自转引起的图像歪斜畸变

如图3-47,轨道高度的MSS,扫描镜来回摆动,在两次有效扫描间隔中,卫星由北北东向南南西运行,地球自西向东自转,造成有效扫描依次向西扭移,图像发生歪斜,观测带影像东西两边呈以6条扫描线(474m)为阶高的阶梯状,标准像幅的原始MSS图像不是正方形,而是扭斜成有两条阶状边的平行四边形。例如,北京幅MSS影像的第2340条扫描线起点相对第1条扫描线起点西移了10km。因此,MSS等光机扫描图像一般都需要进行歪斜校正处理。

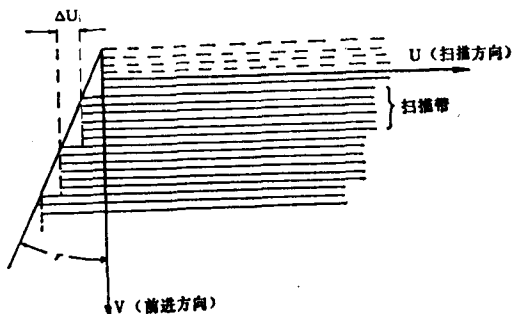


图 3-47 地球自转引起的图像歪斜畸变

(据刘政凯, 1991)

录在数字磁带上,形成数字化潜像。数字化潜像磁带在扫描成像仪(图3-13),如C-4500扫描记录仪、Fire240激光彩色胶片记录仪等,进行电光转换,在胶片上扫描出与像元DN值相对应的灰度不同的图像,DN=0时正片上呈黑色,DN=127(63, 255)时为白色。实际应用中常把DN值归并成人眼能够识别的较少的灰度等级,再形成图像,如MSS、TM图像下方表示灰度深浅的灰阶,就是从图像上区分地物波谱特性差异的尺度。由于DN值只是辐射量的相对量度,各波段的最大DN值是不相等的,所以各波段的影像灰阶级差($DN_{max}/14$)不同,因此,两个波段图像上灰阶相当的地物,亮度并不一定相同。

(二) MSS、TM图像的波谱分辨率与多波段效应

多波段图像分波段记录地物的波谱特性,同一地物在不同波段的DN值差异及不同地物在同一波段的DN值差异,构成图像的波谱特征信息(波谱信息)。不同波段图像识别和区分地物的能力不同,具有各自的波段效应,称多波段效应。如可见光波段图像主要反映地物的颜色和亮度差别,近红外波段可反映氧化铁、粘土矿物及其它含OH⁻矿物、碳酸盐岩、土壤湿度等特征,热红外波段除反映地面辐射温度进而揭示地物的热特性外,还可以区分不同的硅酸盐矿物和岩石。因此,可以结合地物波谱特性分析,利用多波段效应,识别和区分地物。

MSS、TM图像的波谱分辨率与多波段效应简述如下(参见表3-6):

TM₁(0.45—0.52μm)属蓝绿光波段对水体穿透力强,对叶绿素和叶色素浓度敏感。植被、水体、土壤等在此波段反射率差别明显。有助于判别水质、水深、水中叶绿素分布、沿岸水流、泥沙情况和近海水域制图,可用于土壤和植物分类。影像色调,植被最暗,水体次之,新鲜雪最浅。

二、光机扫描图像的波谱特性

(一) 光机扫描图像(数据)的波谱意义

像元是扫描图像中最小的可分辨面积,也是成像过程中利用电子计算机处理时的取样点。像元对应的DN值代表该像元内地物的平均辐射值,随地物的成分、结构、状态、表面特征及所在的波段而变化。DN值按一定的格式记

表 3-6 陆地卫星MSS与TM性能比较表

MSS						TM				
波段号		波长(μm)	辐射灵敏度 NE Δ P(%) NE Δ T(K)	地面分辨率 (m)	量化级	波段号	波长(μm)	辐射灵敏度 NE Δ P(%) NE Δ T(K)	地面分辨率 (m)	量化级
L1,2,3	L4,5					L4,5				
						1	0.45—0.52	0.8%	30	256
4	1	0.5—0.6	0.57%	80	128	2	0.52—0.60	0.5%	30	256
5	2	0.6—0.7	0.57%	80	128	3	0.63—0.69	0.5%	30	256
6	3	0.7—0.8	0.65%	80	128	4	0.76—0.90	0.5%	30	256
7	4	0.8—1.1	0.70%	80	64	5	1.55—1.57	1.0%	30	256
						6	10.40—12.50	0.5K	120	256
8		10.4—12.6	1.4K	240		7	2.03—2.35	2.4%	30	256
数据率	15Mb/s					85Mb/s				
各波段 像元数	2340 \times 3240=7.6 \times 10 ⁸					1—5,7波段: 6166 \times 6166=30 \times 10 ⁸ 6波段: 1542 \times 1542=2.4 \times 10 ⁸				
一景总信息量	30Mb					230Mb				
重 量	69kg					227kg				
功 能	50W					320W				

MSS₄ (0.5—0.6 μm) 与 TM₂ (0.52—0.60 μm) 属绿黄光波段, 对水有较强的透射能力, 水体色调较浅, 可反映一定深度 (>10m) 水下地形, 有利于识别水体浑浊度、沿岸流、砂洲等。叶绿素在此波段有一次反射峰称绿峰, 健康植物对绿光有一定反射, 影像色调较浅, 植被分布范围和生长密度可以得到反映。可用于探测健康植物绿色反射率, 按绿峰反射评价植物生活力, 区分林型、树种。蓝、绿、黄色地物影像一般呈浅色调, 随着红色成分的增加而变暗。浮在水面的油污和金属化合物因妨碍绿光透过也有所显示。陆地上颜色较浅的岩石地层和第四系松散沉积物、城镇、采石场等呈浅色调。受散射光影响, 此波段图像反差较小, 地物边界轮廓有些模糊。

MSS₅ (0.6—0.7 μm) 与 TM₃ (0.63—0.69 μm) 属橙红光波段, 对水体有一定的透射能力 (约2m), 可反映水中泥沙含量、水下地貌和泥沙流。为叶绿素的主要吸收波段, 健康植物影像绿色调较深, 病害植物, 伪装的枯树等则呈浅色调。可反映不同植物的叶绿素吸收和健康状况, 用于区分植物种类和覆盖度。橙红色地物影像一般呈浅色调, 绿色地物则为深色调。裸露的地表、植被、土壤、水系、岩石、地层、地貌特征等的影像清晰, 色调层次多, 信息量丰富, 常用来根据宏观和微观地貌特征和色调差别, 进行岩性和地质构造解译, 如含 Fe³⁺ 较多的岩层与含炭质较多的岩层或中酸性岩石, 色调和形态都有明显差异。断裂、褶皱、基岩与第四系松散沉积物的界线, 可从水系特征、色调及形态加以识别。对第四系松散堆积物的粗细颗粒分布规律及类型的划分, 也有一定的效果。用于地貌特征研究效果较好。

MSS6(0.7—0.8 μm)、MSS7(0.8—1.1 μm)与TM4(0.76—0.90 μm)属摄影红外波段。这几种图像波段效应相似,是水的强吸收和植物的强反射波段。图像清晰、反差大、立体感强,能显示各种地形细节,如微水系、微地貌和一些人工建筑物。图像上水体为黑色调,浅层地下水丰富或土壤湿度大的地段、城镇等色调较深。有利于研究水体分布,划分水陆界线,判别河流、冲沟有无流水,寻找浅层地下水,识别与水有关的地质构造和隐伏构造。充水断层、平原区的新凹陷色调较深,而隆起区色调较浅,富水地层色调较深。第四系沉积物类型及形成顺序,如不同时期的堆积物、洪积扇、洪积平原与滨海平原等也有明显地反映。还可用于海水、海水温度分布及地热的研究。

健康植物对近红外波具有较强的反射,为明亮的浅色调,而病害植物则呈较深色调。阔叶树色调浅,针叶树色调相对较深。通过与MSS4,5或TM2,3的影像色调对比研究和纹理特征分析,易于圈定植被分布范围,区分植物是树林、农作物还是草地,调查植物量和测定作物长势。通过植物与水分的相关性,可在图像上研究某些被植被掩盖的岩石、地层或隐伏构造,例如,植被发育的泥质岩地层、植被生长不好的灰岩地层、充水断层等,在图像上有明显的差异。

TM5(1.55—1.75 μm)属近红外波段,没有对应的MSS图像。此波段处于水的吸收带(1.4—1.9 μm)内,对地物含水量反映敏感,可用于土壤湿度、植物含水量调查、水分状况研究、作物长势分析等。牧草同阔叶林、花岗岩与裸土的差异得到增强,并大大提高了区分不同类型作物的能力。经过处理的TM₅图像,可区分出裸露的、被草覆盖的及有树覆盖的表生矿。影像色调雪比云深,水成云比冰晶云浅,易于区分云与雪,云与裸地,冰川雪线更易辨认。

MSS8(10.4—12.6 μm)与TM6(10.4—12.50 μm)属热红外波段,根据地物发射辐射差别,可在影像上区分草本植物和木本植物,识别大面积的沙漠化。可提供关于湿地淡水与盐水混合、小水体深度、滨海水位和热源信息。区域性地面湿度变化也有明显反映。可用于研究区域岩浆活动和与人类有关的地表热流变化。夜间热红外影像已用于区分岩性差异。由于近地表水通常集中在断层面与节理面,故其温度与周围低,因此也可用于查明断裂构造。另外还用来观测湖、河、海岸和雪盖区表面温度的变化。

TM7(2.08—2.35 μm)属近红外波段。这是为地质研究追加的波段。位于水的强吸收带,土壤的反射特征与可见光波段差不多,水体呈黑色调,其它地物影像与可见光波段影像相近。此波段是绝大多数造岩矿物反射波谱的高峰段,而含氢氧基矿物(如粘土)和碳酸盐矿物(如方解石)具有判别性的特征波谱吸收带,在影像上呈暗色调,所以TM7图像对直接出露地表的粘土与碳酸盐矿物较敏感。TM7同TM2-5图像的综合利用,可以探测热液蚀变特征标志的含铁粘土矿物,填绘碳酸盐岩地层的岩相变化图及干旱半干旱区的热液蚀变分布图。

(三) 遥感图像的时间特性—多时相效应

航天遥感多以一定的覆盖周期对地表重复成像,获取多时相遥感图像。由于不同时期太阳辐射、气候、植被等环境因素的变化,造成地物电磁辐射的差异,地物在不同季节或日期的同波段影像色调也会有差别,这就是遥感图像的多时相效应。如北方冬季,因气候干燥寒冷,植被稀疏,MSS5影像色调能较真实地反映岩石等地物的波谱特征,而夏季的MSS5影像,由于受地表水和植被的干扰,会掩盖地物的真实面目,影像色调不能如实反

映地表岩石等的波谱特征，但对研究植被和与植被有关的地质现象，效果较好。多时相效应有利于对地质体等进行时间上的对比研究和动态现象的监测。

（四）热红外扫描图像的波谱特性

热红外扫描图像是地物热红外波的热像，简称热图像，是地物发射辐射产生的影像，主要反映地物的辐射温度信息，可全天时成像。热图像的波谱特性与反射波谱的紫外、可见光、近红外图像大不相同。

1. 热图像的色调特征

热图像的色调深浅，反映地物在热红外波段热辐射能量的大小。地物热辐射能量大小取决于地物的发射率和真实温度，特别是由于与真实温度的四次方成正比，因此热图像的色调主要反映地物的真实温度。但是大多数热红外扫描仪记录的是地物的辐射温度（亮度温度） $T_{\text{辐}}$ ，而不是地物的真实温度 $T_{\text{实}}$ ，它们之间的关系为： $T_{\text{辐}} = \epsilon^{1/4} \cdot T_{\text{实}}$ ，式中 ϵ 为发射率，因为 $\epsilon < 1$ ，所以 $T_{\text{辐}} < T_{\text{实}}$ 。

热图像上，真实温度高或发射率大的强辐射体为浅色调，常称为“暖信息”、“暖色调”，反之则为深色调，称“冷信息”、“冷色调”。地物的真实温度取决于自身的热学性质，如热传导率、热扩散率、比热、热惯量等（表2-1），影响最大的是比热和热惯量。地物的比热大，使它升温需要的热量就多，在其它条件相同的情况下，白天被太阳加热时，比热大的地表真实温度上升较慢，幅度也较小；比热小的地物表面真实温度上升较快，幅度也较大。在夜间降温时，比热大的地物表面真实温度下降较慢，幅度较小；比热小的地物表面真实温度下降较快，幅度较大。即比热大的地物表面温度周日变化小，比热小的地物表面温度周日变化大（图3-48）。如水与岩石和土壤的热惯量相近，但水的比热大，又能通过对流使表面和内部温度较快的均一化，与岩石和土壤相比，表面温度白天低而夜间高，所以水在白天热图像上为“冷色调”，在夜间热图像上为“暖色调”。

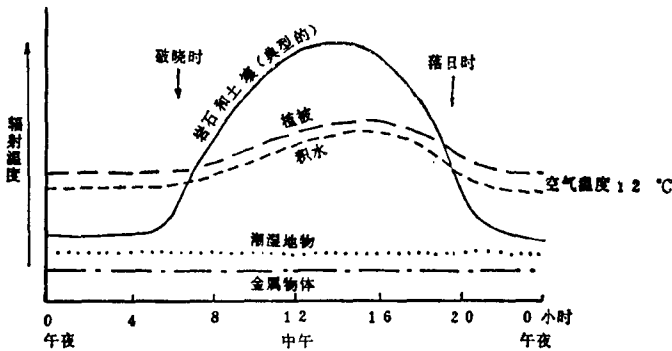


图 3-48 典型物质的周日辐射温度曲线（示意图）

（据F.F. 萨宾，1931）

热惯量对地物表面温度的影响与比热类似，热惯量大的地物表面温度周日变化小，热惯量小的地物表面温度周日变化大。岩石、矿物的温度变化主要与热惯量有关，大多数岩石的热惯量随密度增加而呈线性增加。在太阳的日周期变化中，热惯量低的岩石（页岩、火山渣），白天可达到相当高的表面温度，夜间则冷却到一个相当低的温度；热惯量高的岩石（玄武岩、白云岩、石英岩、砂岩）在白天相对较冷，夜间相对较暖。地物热学性质的差异致使热图像的热反差大于可见光图像上的反射率差异，在夜间成像的热图像上更为

明显。热图像在区分岩性、地层,研究地质构造,寻找放射性矿、硫化矿、含煤岩系等矿产上具有特殊的效果。根据断层的两盘岩性和富水性差异造成的不同温度场,或断层充水条件变化在热图像上出现的温度差异,研究隐伏构造,水的比热起着决定性作用。

此外,成像时间、季节、气象和环境条件等对热图像的色调也有重要影响。为更好地区分不同地物,根据地物表面温度周日变化曲线(图3-48, 3-49),应选在地物之间温差最大的时间而不能选在拂晓和落日时成像。

地形起伏使阳坡和阴坡接受的太阳能量不同,造成地面温度的明显差异。一些特殊的地貌部位,如正对山口的地面,受山谷风吹拂,温度会低于周围地面。地面风的存在与否也会使地表温度明显不同。气候变化直接影响地面温度,由于水分蒸发会带走大量热能,因此潮湿地面比干燥地面温度要低。突然性的天气变化,如寒流入侵等也会使地表温度出现反常现象。云层在热图像上呈不规则的斑状、团块状。无线电波、雷达微波的干扰,使图像变模糊或叠加波状云纹等。

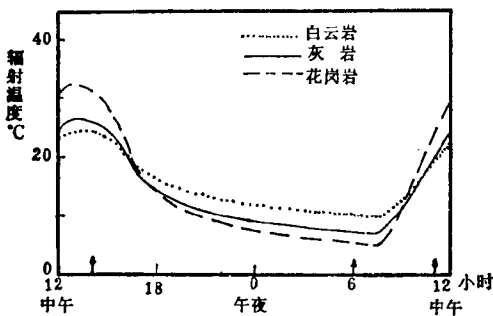


图 3-49 白云岩、灰岩、花岗岩周日温度曲线
(据F.F.萨宾, 1981)

2. 热图像的热晕效应及热阴影

受空气、风等因素影响,一个很小的热目标,特别是一些高温地物,其热图像会比原物大许多倍,这就是热图像的热晕效应。

可见光阴影属光阴影,有本影、落影之分,光照消失,光阴影也随之消失。而热图像的阴影属热阴影,无本影、落影的区别,太阳落山后,虽然光照消失,但地物阴阳面的温差并未马上消失,在

太阳落山后一段时间内的热图像上仍然有阴影存在,称热阴影。热阴影的持续时间随地物热学性质差异有长有短,一般在黎明前基本消失,此时的热图像色调差异主要是地物本身热学特性差异,用于解译岩性效果较好。白天热图像则具有地貌特征清晰的特点。

3. 热图像的波谱分辨率

大多数热影图是宽谱带(8—14 μm)单波段,波谱分辨率较低,区分地物的能力较差。近期已出现多波段热红外图像,如我国研制的HS3B型红外扫描仪,将8—14 μm 的波谱带分成:8.0—8.9 μm 、9.1—10.1 μm 、10.3—11.4 μm 、11.6—12.8 μm 、13.0—14.0 μm 和8—14 μm 六个波段,能更精细地记录地物发射热红外辐射的差异,大大提高了热图像区分地物的能力。

4. 热图像的温度分辨率

指能分辨的最小温度差,或指对两个不同辐射源的辐射温度的分辨能力。现代热红外遥感器温度分辨率已达0.01 $^{\circ}\text{C}$,资源遥感中使用的热红外扫描仪,温度分辨率大多在0.1—0.5 $^{\circ}\text{C}$ 之间。早期的热图像未作温度标定,只能定性地确定地物温度的相对高低,而不能得知地物的准确温度值。近期的热图像都是经过温度标定的,图像上有灰阶或彩色标尺,每一灰阶颜色表示一定的温度范围,将图像中的色调或色彩与灰阶或彩色标尺对比,就能确定地物的温度范围。彩色热影像对地面的温度分布更加醒目,两种色区的界线即为地面的等温线。

(五) 高级甚高分辨率辐射计 (AVHRR) 简介

AVHRR是“诺阿”(NOAA)气象卫星上使用的一种五波段光机扫描辐射计系统。工作波段: $0.58-0.68\mu\text{m}$ 、 $0.725-1.1\mu\text{m}$ 、 $3.55-3.93\mu\text{m}$ 、 $10.3-11.3\mu\text{m}$ 、 $11.5-12.5\mu\text{m}$, 瞬时视场 1.1km , 总视场 $\pm 56^\circ$, 扫描宽度 2400km , 温度分辨率 0.12k (300k 时)。主要用于观测云层和冰雪覆盖、水陆边界并成图, 测量地面、水面和云顶温度, 监测台风, 大范围区域地质研究。

第四节 固体自扫描图像特性

SPOT1搭载的两台相同的HRV, 采用大型固态线列阵探测器件的推扫式成像技术, 在轨道高度获取了高空间分辨率遥感图像。

一、HRV成像特点

HRV结构如图3-50, 性能参数见表3-7, 收集系统是透镜, 探测系统是CCD线列阵, 多波段每线3000个CCD探测元, 形成3000个对应地面面积为 $20 \times 20\text{m}^2$ 的像元, 全色波段每线6000个CCD探测元, 形成6000个对应地面面积为 $10 \times 10\text{m}^2$ 的像元。CCD线列阵垂直于卫星运行方向横向排列, 由卫星的运行完成纵向推扫。扫描宽度为线列阵CCD探测元横向总视场对应的地面宽度。HRV反射镜能改变观察角度, 兼有垂直和倾斜观察能力。

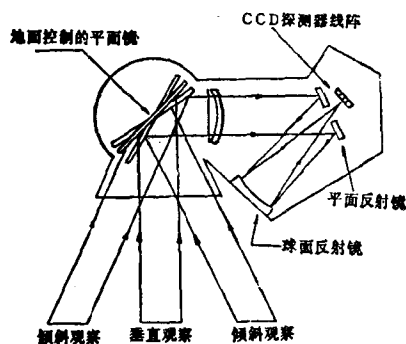


图 3-50 HRV结构图

(据北京大学遥感技术应用研究所, 1986)

(一) 垂直观察推扫成像

如图3-51, 两台HRV垂直地面进行推扫, 形成两条互有重叠的观测带, 中心线为地面轨迹, 单条观测带扫描宽度 60km , 中间重叠 3km , 两条观测带总扫描宽度 117km 。相邻轨道在赤道处间距 108.4km , 相邻轨道观测带有 4.3km 的重叠。

(二) 倾斜观察推扫成像

如图3-52, HRV的反射镜可在卫星运行方向的左右两侧 27° 范围内, 做91个档次的变化, 每档 0.6° , 形成90种倾斜观察角度, 总观测范围 950km , 最边缘单带扫描宽度 80km 。

由于HRV可以按指令改变扫描镜的观察角, 在SPOT卫星26天的覆盖周期内, 可在不同轨道对同一地面点进行重复成像, 重复成像次数与纬度有关, 如图3-53, 赤道上为7次, 中纬度(45°)处为11次。这对在较短时间内探测局部现象的变化尤为有用, 同时提高了图像的有效覆盖率。在不同轨道对地面同一区域成像, 可形成立体像对, 供立体观察、描绘等高线或建立数字地形模型(DTM)、立体显示与立体测图。

表 3-7 HRV性能参数表

性能	工作方式	多波段方式	单波段全色方式
波段范围(μm)		XS ₁ 0.50—0.59 XS ₂ 0.61—0.68 XS ₃ 0.79—0.89	PA 0.51—0.73
视场角		4.13°	4.13°
垂直观察像元尺寸(m^2)		20×20	10×10
地面分辨率(m)		20	10
线阵上像元数(个)		3000	6000
垂直观察像幅地面面积 (标准像幅覆盖面积)(km^2)		60×60	60×60
倾斜观察像幅最大地面宽度(km)		80	80
数据率		25Mb/s	25Mb/s
视场可控制转动		0±45档 计91档	
视场转角		每档0.6° 最大27°	
视场转动地面距离		950km	
最大控制距离		±475km	
波谱灵敏度		可探测低于0.5%的地面反射率变化	

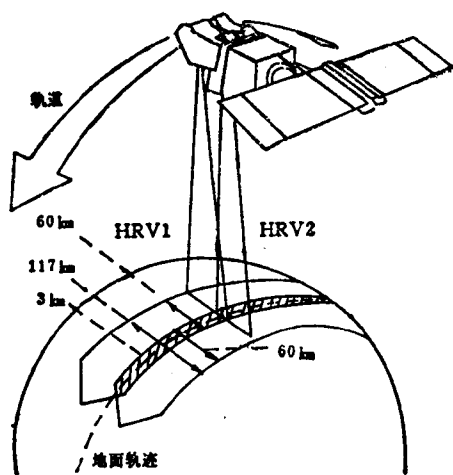


图 3-51 HRV垂直观察推扫成像
(据北京大学遥感技术应用研究所, 1986)

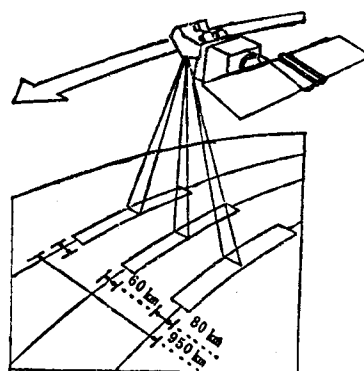


图 3-52 HRV倾斜观察推扫成像
(据北京大学遥感技术应用研究所, 1986)

二、HRV图像特性

(一) HRV影像的空间特性

HRV取消了MSS和TM的一维行扫描, 每条扫描线上各像元同时成像, 有一个投影中心, 扫描线随卫星向前运行进行纵向推扫, 形成影像条带, 所以HRV影像仍属多中心投影。由于同一条扫描线上的像元同时成像, 因此, 不同于光机扫描图像, HRV影像不存

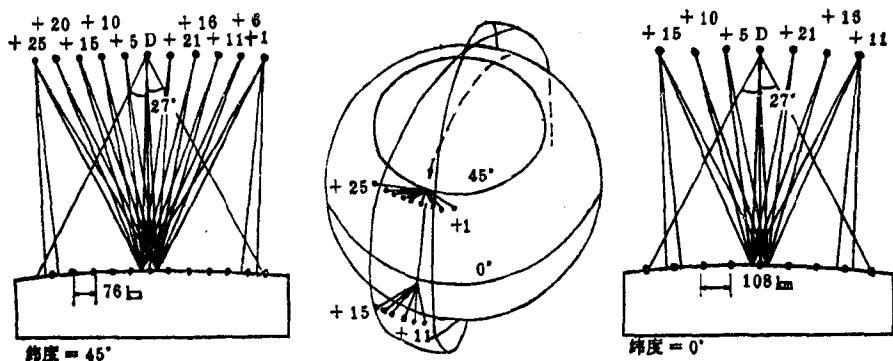


图 3-53 SDOT卫星在赤道和纬度45°处重复成像

(据濮静姬, 1992)

在扫描畸变, 对同一基准面, 图像两侧与中心部位影像比例尺相同, 几何精度更高。HRV影像的地面分辨率取决于CCD探测元的大小, 多波段方式为 $20 \times 20 \text{m}^2$, 全色方式为 $10 \times 10 \text{m}^2$ 。

(二) HRV影像的波谱特性

HRV的全色波段(PA)属可见光波段, 但缺少紫光、蓝光。多波段的三个波段(XS 1, 2, 3)相当于TM₂, 3, 4或MSS₄, 5, 7(但比MSS的谱带要窄), 其色调特征、波段效应相似。

第五节 成像雷达图像特性

一、成像雷达图像的空间特性

成像雷达侧向发射脉冲雷达波束, 按回波到达的先后顺序成像(图版68), 所以有其独特的空间特性, 除投影性质为旋转斜距投影、地面分辨率分为互不相关的方位向分辨率和距离向分辨率外, 还有:

(一) 近距离压缩

雷达图像上, 目标影像在距离向的空间位置, 有斜距和地距两种显示形式, 如图3-54, R 为斜距, $R = c \cdot \Delta t / 2$, c 为光速, Δt 为雷达波往返目标所需的时间; R_0 为地距, $R_0 = R \cdot \cos \beta$, β 为俯角, 指目标与雷达天线连线与水平面的夹角, 在雷达波束照射区内, 地面上各点所对应的俯角不等, 近距离端大, 远距离端小, ϕ 称入射角, 指入射的雷达波束与入射点处地表面法线的夹角。对于平坦地形, 俯角与入射角互为余角, 如果雷达波束的俯角沿途不变, 则入射角将保持为常数。但当沿途地形坡度变化时, 则有效入射角(ϕ)就随之而变化(图3-55)。

雷达是一个测距系统, 直接测量的是雷达到目标的斜距, 许多雷达图像沿距离向都用斜距显示。斜距显示的图像上, 原来等长度的目标长度将被压缩, 且近距离端比远距离端压缩的多, 造成距离向的几何失真, 这种现象称近距离压缩。如图3-54, 地面上A、B、C三个目标长度相等, 在斜距图像上的影像 $A_1 < B_1 < C_1$ 。地距图像能如实反映平坦地面目标间的距离关系, 在地距图像上的影像 $A_2 = B_2 = C_2$ 。

(二) 透视收缩

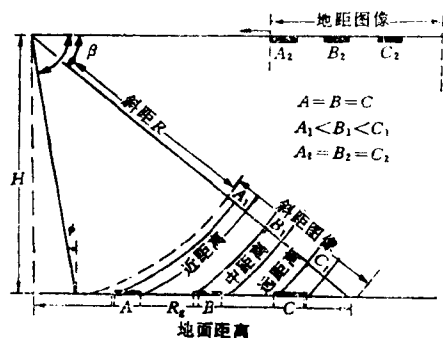


图 3-54 雷达图像的距离显示形式
(据谢寿生, 1987)

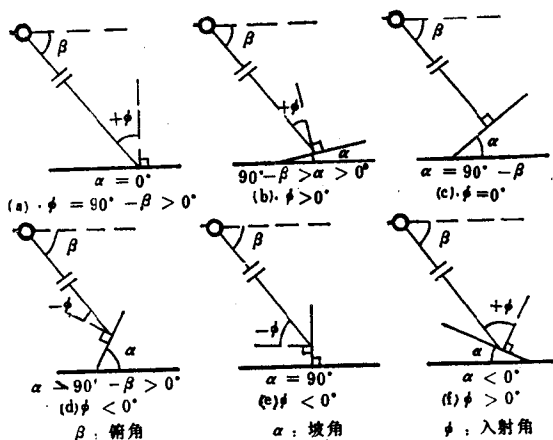


图 3-55 俯角、入射角和坡度角的关系
(据郭华东, 1991)

雷达波辐照到地面的斜坡的时间长短, 决定了斜坡在雷达图像上的长短。所有面对雷达的斜坡, 其雷达图像长度都比实际长度短, 这种现象称为雷达的透视收缩。如图3-56, 假设雷达波束到达斜坡顶部、中部、底部的斜距分别为 R_T 、 R_M 、 R_B , 在 (a) 中, $R_B < R_M < R_T$, 雷达波先辐照到坡底再到辐照坡顶, 坡底先成像, 坡顶后成像, 斜坡在斜距图像上影像长度为 ΔR_1 , 显然 ΔR_1 小于坡长 L , 即斜坡长度在图像上被压缩了; (b) 中, $R_B = R_M = R_T$, 坡底、坡腰、坡顶的回波同时返回雷达, 成像于同一点; (c) 中, $R_B > R_M > R_T$, 坡顶先成像而坡底后成像, 斜坡影像长度也小于坡长 L , 斜坡同样被压缩。雷达图像的透视收缩, 实际上是雷达波能量集中的表现, 前坡收缩比后坡严重, 前坡影像比

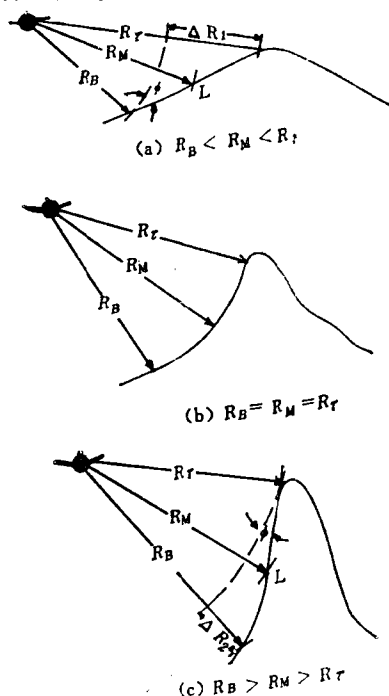


图 3-56 斜坡的雷达成像
(据郭华东, 1991)

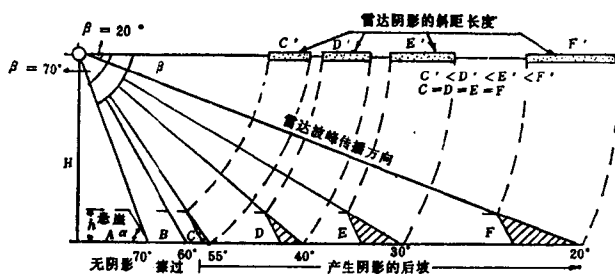


图 3-57 雷达阴影的产生及与俯角的关系
(据郭华东, 1991)

后坡要亮,在整个斜坡收缩成一点时,影像最亮。

(三) 雷达叠掩

一些坡度很大的目标,如陡峭的山峰等(图3-56(c)),在大俯角情况下,顶部比底部离雷达天线近,顶部先于底部成像,产生目标倒置的视觉效果,这种现象称为雷达叠掩(或顶底位移)。当有效入射角 $\phi \leq 0$ 时,便会产生叠掩现象,俯角越大,出现叠掩的几率越高。雷达叠掩多出现在近距离端,后坡不会产生叠掩。

(四) 雷达阴影

雷达波沿直线传播,当受到高大目标阻挡时,目标背面将有雷达波照射不到的盲区,因不会有回波返回雷达,在图像的相应位置形成黑色调的暗区,这种暗区称雷达阴影。如图3-57,雷达阴影出现在距离向背离雷达的方向上,阴影大小与目标在雷达波束中所处的俯角范围及后坡的坡度角(α)有关,位置A, $\alpha < \beta$,后坡整个被照射,无阴影;位置B, $\alpha = \beta$,雷达波擦掠后坡,一般不形成阴影,若后坡起伏不平,会产生局部阴影;位置C—F, $\alpha > \beta$,雷达波照射不到后坡,产生阴影。当后坡坡度角相同时,俯角越小,阴影越长,雷达阴影多出现在远距离处。

适当的阴影能增强图像的立体感,丰富地形信息,但阴影过大会掩盖许多地物信息,在地形起伏大的山区,应选用适当的雷达俯角,避免阴影过大。为补偿阴影区丢失的信息,突出显示不同方向的线性地物,可采用多视向成像,使在一种视向时的阴影区目标信息在另一视向的雷达图像上反映出来。

二、成像雷达图像色调的影响因素

雷达影像色调的深浅反映地物后向散射回波的强弱,回波强色调浅,回波弱色调暗(图3-58)。回波强弱取决于地物与雷达波的相互作用和成像雷达系统的特性,具体讲就是与成像雷达的工作波长、俯角和极化方式,地物本身的表面粗糙度、物理电学特性(介电常数等)和地物几何形态产生的角反射器效应等有关。

(一) 成像雷达的工作波长

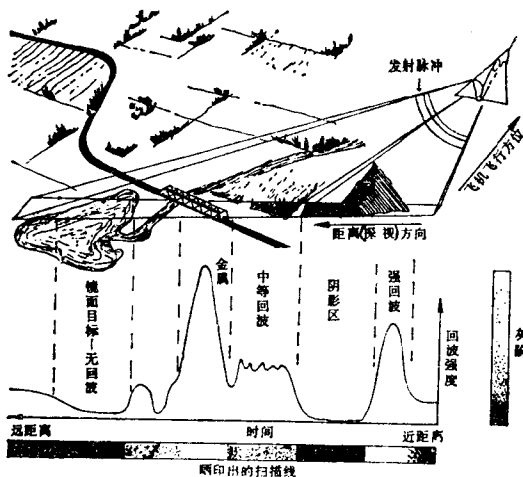


图 3-58 雷达影像色调与回波强度示意图

(据F.F.萨宾, 1981)

成像雷达的工作波长见表2-3。同一地物在不同波长下的回波有很大不同。一般,波长短,图像分辨率高,但穿透能力差;长波长,有一定的穿透能力,但图像分辨率较前者差。为了兼顾两方面的优点,目前最常用的是X波段($\lambda = 3\text{cm}$)和L波段($\lambda = 23.5\text{cm}$)雷达。雷达工作波长还直接影响地物表面粗糙度和介电常数,从而影响回波强弱。

(二) 成像雷达的照射俯角

雷达回波强度与俯角的关系如图3-59(c),随俯角的增大,回波强度增大。对于平滑表面俯角大则回波强,随俯角的减小回波强度迅速下降。对粗糙表面,

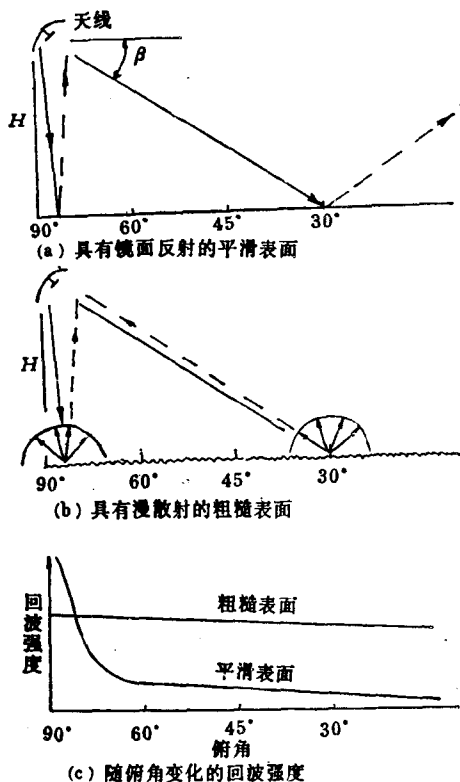


图 3-59 随俯角变化的平滑表面和粗糙表面的雷达回波
(据 F.F. 萨宾, 1981)

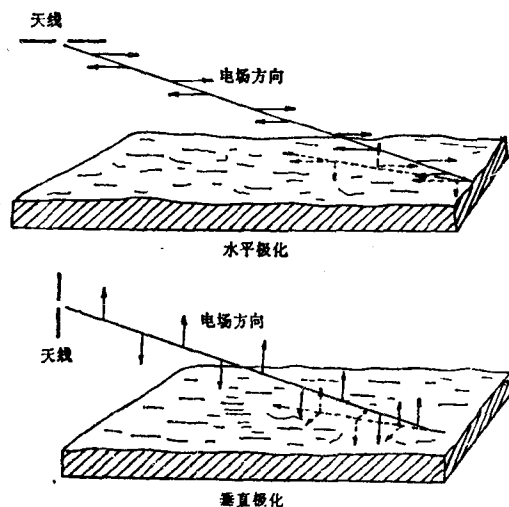


图 3-60 水平极化和垂直极化
(据日本遥感研究会, 1981)

回波强度随俯角增加变化较平缓。

(三) 成像雷达的极化方式

极化指电磁波在一个振荡周期内空间一给定点的电场矢量的方向。电场矢量方向不随时间变化的电磁波称为线极化波，它分解为两个方向的极化：水平极化（H）和垂直极化（V）。如图3-60，水平极化电场矢量与入射面（包含入射雷达波束并与照射面相垂直的面）垂直，垂直极化电场矢量与入射面平行。

成像雷达有四种极化组合工作方式，若雷达发射和接收的雷达波极化性质相同称同极化方式，有HH和VV两种；若不相同则称交叉极化方式，有HV和VH两种。极化组合方式不同，同一地物产生的回波强度不同，雷达影像色调不同，如玄武岩的HH回波大于HV回波，HV影像要暗些。用可控极化方式的成像雷达进行多极化遥感，能大大增加雷达影像的地物信息。大多数地物对水平极化能产生较强的回波，资源遥感成像雷达多是HH方式，这样产生的回波信号最强。多数地物产生回波的极化性质与入射波极化性质相同，少数地物会改变入射波极化性质而产生另一种极化性质的回波，这种现象称去极化作用。正是由于有些地物具有去极化作用，才会有交叉极化。HH影像上不清晰的岩石界线，HV影像上则可能明显地显现出来。同极化的HH与VV影像，在粗糙地面地区，后向散射回波强度无明显差别，影像差别不大，但对平滑的地面HH影像的信息没有VV影像的丰富。

表3-8列出四种成像雷达系统的参数。

表 3-8 成像雷达参数表

参 数 \ 雷 达 名 称	SIR-A	SIR-B	CAS/SAR	ERR
飞行高度 (km)	260	352, 274, 225	7	10
波 长 (cm)	23.5	23.5	3	3
极化方式	HH	HH	HH, HV, VV, VH	HH
天线视角	47°	15°—60°	19°	14°
入 射 角	50°			
射程向覆盖宽度 (km)	50	20—50	35	18
距离向分辨率 (m)	40	14—46	10	3
方位向分辨率 (m)	40	20—30	10	3
数据记录方式	光学	数字	光学	光学

(据郭华东, 1991)

(四) 地物表面粗糙度

地物表面粗糙度对雷达回波影响也很明显。如图3-59(a)、(b), 一般规律是平滑表面反射全部入射波, 反射角等于入射角, 方向相反, 形成镜面反射, 没有后向散射, 影像为黑色调; 粗糙表面产生各个方向的散射(漫反射), 后向散射回波较强, 影像为浅色调; 中等粗糙表面产生混合反射, 有后向散射回波但较弱, 影像为深浅不同的灰色调。地物表面粗糙度可以表示照射区域的散射程度, 是一个与雷达工作波长和入射角有关的相对量。根据瑞利判据, 地物表面按粗糙度的分类见表3-9。

表 3-9 地物表面粗糙度分类判据 ($\phi = 45^\circ$)

波 长 \ 表面类型	Ka (0.86cm)	X (3cm)	L (23cm)
平滑表面	$h < 0.05\text{cm}$	$h < 0.17\text{cm}$	$h < 1.41\text{cm}$
中等粗糙表面	$0.05\text{cm} < h < 0.28\text{cm}$	$0.17\text{cm} < h < 0.96\text{cm}$	$1.41\text{cm} < h < 8.04\text{cm}$
粗糙表面	$h > 0.28\text{cm}$	$h > 0.96\text{cm}$	$h > 8.04\text{cm}$

可见, 表面粗糙度反映的是地物表面的微起伏, 与地形起伏属两个不同的尺度, 是两个不同的概念。

(五) 地物的复介电常数

复介电常数是描述物体表面电性能的复数常数, 取其实部用介电常数表示。地物介电常数大, 反射率高, 回波强, 影像色调浅, 反之则色调深。一般固态物质的介电常数小于10, 如大理岩为8; 大多数不含水物体的介电常数小于6, 如柏油为2.7, 干沙、土壤为2.0—5.0, 而水的介电常数高达60—80。所以, 影响地物介电常数的主要因素是地物含水量, 介电常数随单位体积内液态水的含量呈线性变化, 含水量大介电常数大, 反射率高, 回波强, 影像色调浅。当土壤和植物含水较多时, 介电常数迅速增大, 成为良好的微波散射体, 如新鲜的麦苗、油菜、杨树枝的介电常数分别达37.78、45.46和19.21, 说明植物有较强的回波。对岩石的测量结果表明, 各类岩石的介电常数无太大幅度变化, 含Fe、Mg元素丰富的岩石要高些。如花岗岩平均值为4.77, 片麻岩为5.22, 砂岩为4.80, 闪长岩为

6.22, 白云岩为6.8—8.0, 熔岩为5.3—5.6, 赤铁矿为14.2。矿化岩石介电常数在10.73—27.99之间, 显著高于围岩, 有较强的雷达回波。但从丘陵到山区, 对回波具有控制作用的因素是表面粗糙度, 介电常数在大范围的岩性识别中很难成为主导因素。

介电常数还与地物的电导率和雷达波长有关, 它们影响着雷达波对地物的穿透能力。金属和含水量高的地物电导率高, 反射率高, 是最好的散射体; 水泥及石材为中等散射体; 干木头电导率差, 反射率低, 是最差的散射体。雷达波长越短, 有效穿透越浅; 土壤含水量越高, 雷达波对其穿透深度越浅, 对干沙的穿透深度较大。

(六) 角反射器效应

地物的几何形态及与雷达波束的几何关系也直接影响回波强度。

建筑物墙面与地面、排树与地面等组成的二面角、三面角, 构成天然角反射器(图3-61)。当角反射器的对称轴与入射雷达波束方向一致时, 入射雷达波几乎能全部返回雷达系统, 回波强, 影像呈很亮的浅色调, 如城镇、村庄在雷达图像上呈明亮的斑块或斑点状, 这主要是角反射器效应的结果。

线状地物当其走向与入射雷达波束正交时, 也会产生强回波, 如与雷达视向垂直的铁路、公路、河堤、沟谷、山脉、线性构造等在雷达图像上呈现为醒目的亮线, 而与雷达视向平行的线状地物, 在雷达图像上则不明显。面状地物当其法线方向与入射雷达波一致($\phi=0$)时, 产生强回波, 形成亮色调, 当两者夹角变大时, 回波减弱, 色调变暗, 甚至

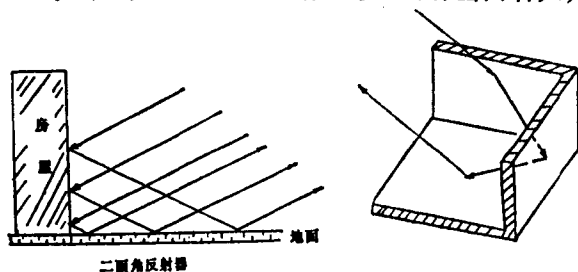


图 3-61 角反射器示意图

不产生回波, 这种现象称方向性效应(图3-55)。由于方向性效应及前坡的透视收缩, 有效入射角较小的山坡会产生强回波, 影像色调可由浅直至白。

成像雷达可以全天候、全天时成像, 对云雾、小雨、植被和干燥地物有一定的穿透性, 其成像的立体效应增强了地形信息, 对线性

构造、环形构造有一定的增强显示作用。星载成像雷达可大面积快速成像且几何失真较小。成像雷达的初步地质应用, 已使人们发现了许多地质和其它遥感手段未曾揭示的地质现象。90年代, 将是雷达遥感的黄金时代。

第四章 遥感图像处理

在遥感技术中,通常把由传感器接收到的原始遥感信息作适当的技术加工,制作成有一定精度和质量的图像,以及从中提取有用信息的过程,称之为遥感图像处理。按其工作性质和内容,可分为预处理和分析判读处理两类。前者旨在把原始遥感数据加工处理成有一定精度和质量、可供用户使用的图像或数字磁带,现主要由接收遥感信息的部门(如遥感卫星地面站)承担;后者则是对预处理产品进行再加工,以提高其分辨效果或提取对特定专业有用的专题信息。遥感地质研究所涉及的主要是后者。由于它直接影响到遥感应用的效果,因而是当今遥感地质工作的不可缺少的组成部分。

遥感图像处理的技术手段,目前使用较多的是通过光学途径实现的光学图像处理和以数字产品通过运算变换实现的数字图像处理。由于遥感信息已越来越多地采用数字记录和储存,故数字图像处理正逐渐成为遥感图像处理的主要手段。近年来,由于光信息处理技术日臻成熟,因此光机混合处理将是今后遥感图像处理的发展方向,但目前尚不占主导地位。故此,本章着重介绍光学图像处理技术和数字图像处理技术。

第一节 光学图像处理

光学图像处理是指以胶片方式记录的遥感影像或由数字产品转换来的影像胶片为处理对象,通过光学或电子—光学仪器的加工改造,对遥感图像进行变换和增强的一种图像处理技术。用作光学处理的仪器和技术手段很多,包括摄影处理、光电处理和相干光处理等等;处理方法上,则有密度分割、彩色合成、边缘增强、反差增强、光学图像比值、光学变换、光学编码等,其中最常用的是假彩色等密度分割和假彩色合成,因此也是本节讨论的重点。

一、光学等密度分割处理

(一) 影像密度的概念

各种遥感信息最终都可以记录在摄影胶片上。对于黑白胶片,最主要的评价指标便是影像密度(亦称黑度)。在摄影技术中,通常以胶片透光率(T)倒数的对数表示,即影像密度 $D = \log \frac{1}{T}$ 。在遥感影像胶片上,它的大小代表了地物反射或发射辐射的强弱。其中,在各类负片中, D 与辐射强度呈正相关,正片则相反。

不同遥感方式的影像胶片,其密度 D 的物理意义不同。例如,全色摄影,它反映了地物在整个可见光范围内反射太阳光的强度;多波段扫描,记录的是地物在不同光谱段的反射强弱;而热红外,则是地物热辐射的大小,等等。此外,影像密度在胶片上的分布,还构成了各个地物目标的几何特征,如形状、大小、图案、纹理结构以及相互间的位置关系;同一地区同类遥感在不同时间获得的影像,彼此的密度变化又构成不同目标的时间特性。光学图像处理究其实质,就是通过光学途径人为地改变胶片的影像密度,扩大不同

部分的密度差异, 或者以不同色彩显示影像密度的细微变化, 用以压抑“噪声”、强调或突出目标信息, 增强人们对细微密度差异的判读和识别能力。

(二) 假彩色等密度分割

任何一幅遥感图像都可以看作是地物电磁波辐射强度的二维分布函数。对于胶片影像, 可用影像密度值的二维分布来表征; 对于像片, 则为灰度值的二维分布。与地形图的等高线相仿, 照例可按一幅图像中密度 (或灰度) 值的变化范围, 将其划分为若干个等级, 以等值面对影像密度 (或灰度) 函数进行分层 (图4-1), 用等值线图来表示图像各部分的密度 (灰度) 差异变化。在遥感图像处理中称此为密度分割, 或密度分割技术。

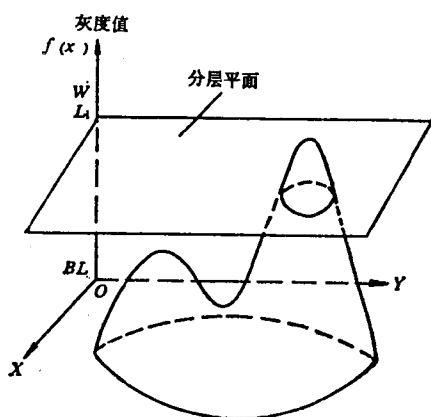


图 4-1 密度分割的几何解释图

(引自陈华慧, 1981)

密度等级以色彩的变化显示成彩色的图像。这种仪器通常称彩色等密度分割仪, 如日本Photosdac型的数字彩色图像分析仪、我国南京产NST-1型密度分割假彩色分析仪等, 基本上都是由小型计算机控制、集光/电、模/数变换于一体的一套闭路彩色电视系统 (图4-2)。

一般情况下, 这类仪器均可按线性、对数变换或指数变换将胶片的影像密度分割为 8、12、24、32、64 等级; 不同密度级的色别可在 64 色内任意选调变换, 并在数秒钟内显示在彩色监视器的屏幕上, 通过反复调节变换色彩, 选择最佳的处理结果; 一般还具有单色或数色抽取显示和面积量算的功能。

(三) 假彩色等密度分割的地学应用

假彩色等密度分割以色彩代替影像密度, 不仅明显改善视觉效果, 而且分割的密度等级可以远高于人眼对黑白灰度 (一般 10 级左右) 的分辨等级, 因此显著提高了人眼对胶片密度差异的分辨能力, 起到了图像增强的作用。但由于它只能处理单张胶片, 只单纯考虑影像密度一个因素, 因此, 往往不能很好地反映地物内部的结构和原有的形态特征, 图像的立体感一般较差, 对同物异谱 (密度) 或同谱异物现象也不易区分。所以, 在实际的地学应用中, 该增强处理方法比较适用于轮廓简单、背景单调、目标特性与影像密度有明确对应关系的地面景况的分析判读。如入海泥沙, 河、湖、海水的水深、混浊度, 地热异常、污染源及污染分布等。一般效果都比较理想, 这方面成功的应用实例也很多。这里仅举二例说明它在地学应用中的意义:

1. 长江河口演变与泥沙扩散

长江口属分汊河口, 由于河口径流与潮流相互消长作用, 以及主流的摆动迁移和汉道

在一般的光学图像处理中, 通常用影像胶片 (正片或负片) 作处理对象, 最简单的办法是等密度制图, 即用光密度计逐点测量胶片密度, 然后连成等密度图。这种图以密度等值线表示, 精度一般较高。但由于是手工操作, 处理速度较慢, 且不具醒目的视觉效果, 故目前已很少采用。不过, 其原理却为后来的图像数字化及光电和计算机等密度分割技术奠定了方法基础。

现今最常用的是假彩色等密度分割法, 即通过光电仪器将胶片上不同的密

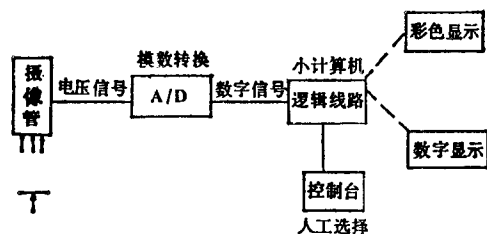


图 4-2 彩色密度分割工作原理方框图

(引自李永颐, 1990)

的更替盛衰,口门地区水下地形十分复杂,以往采取常规海上测量,先后花费了几十年的时间 and 巨额投资才大致弄清了其基本面貌和变化规律。恽才兴等利用水体在红光波段的反射率与其泥沙含量呈明显的正相关的特性,对1978年8月9日长江口(上海幅)陆地卫星MSS-5图像作了假彩色等密度分割处理,根据不同色彩显示的影像密度差异,很容易地将清水、浊水、浑水舌、沉积羽流等区分出来,并解译出它们的分布范围(图4-3)。

2. 琼州海峡的水下地形

雷州半岛与海南岛之间的琼州海峡,海水中泥沙含量极低,水质清澈。由于MSS-4波段对清水有一定的透视效果,因而在该波段图像上水下地形往往有较好的反映。据此,张圣凯对琼州海峡陆地卫星MSS-4图像作了彩色等密度分割处理。在取得的处理结果图像(图版2)上,水下地形的特征得到十分清晰的显示,色彩的变化与水深之间呈现出良好的对应关系,尤其是海峡西口海流造成的水下三角洲扇形扩展的形态特别瞩目,影像增强效果相当显著。

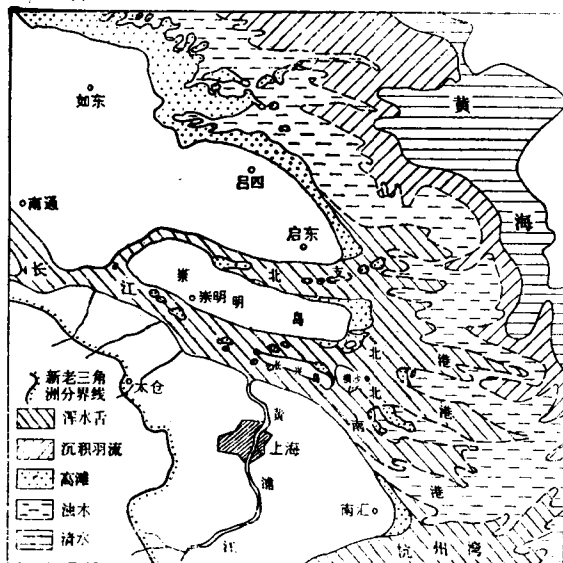


图 4-3 根据彩色等密度分割影像解译的长江口泥沙扩散形势图

(据恽才兴, 1984)

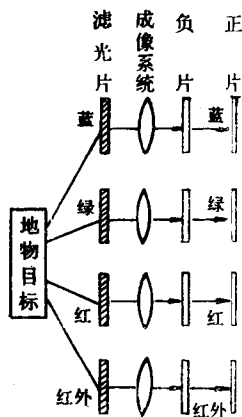


图 4-4 多波段图像生成示意图

二、光学彩色合成处理

对多波段遥感影像的图像处理来说,彩色合成是一种最基本,也是最实用的方法。它通常是将二个或三个波段的黑白图像分别赋以红、绿、蓝三原色或黄、品红、青三补色,

并使之精确叠合,从而生成色彩丰富的彩色图像。多波段遥感生成不同光谱段的黑白图像是色光分离的过程(图4-4),彩色合成则反过来,是色光相混复原的过程。

光学彩色合成的方法很多,其中属加色合成的主要有:

①光学投影法 借助配有红、绿、蓝等滤色片的光学投影系统(多为各种型号的彩色合成仪),将不同波段的黑白透明正片(一般用三张)置于其中,经光源照射投影到同一个屏幕上,合成显示为彩色图像。既可以直接观察分析,也可以晒印或翻拍成彩色像片。

②照相放大法 通过常规的照相放大装置放大晒印成彩色像片。一般用几张多光谱分色负片,依次变换负片和红、绿、蓝滤色片,分次(多为三次)曝光在同一张彩色相纸上。即所谓分层曝光法。近年来,也常采用将三个波段的影像分色扫描到一张彩色负片上,再由放大机一次放大曝光到彩色相纸上。

通过减色法合成的主要有:

①染印法 将多波段黑白负片通过放大或接触晒印拷制成浮雕模片(正片),然后用三补色染液分别染色,再依次叠印在空白接印纸上,印得彩色图像;也可分色染印成单色透明正片,然后置于透图台上叠合显示成彩色图像,同样既可观察分析,也可用晒印成彩照。

②印刷法 按彩色印刷工艺将各波段的图像分别制成网目印刷板,然后用二色、三色(黄、品红、青)、四色(黄、品红、青、黑)逐一套印,制成纸质的彩色图片。

③重氮法 方法原理与染印法类似,即用分色的重氮片,经与多波段负片接触晒印,再经熏成单色透明正片,而后置于透图台上叠合显示出彩色图像。

上述各种方法,合成仪法速度快,可灵活调选最佳色彩,像质也较好,但仪器较昂贵;各类减色法,简便价廉,但信息损失较大,像质一般不高;而照相放大法,虽操作技术要求较高,但彩色像片的分辨率和色彩效果却是其他方法所无法比拟的。因此,在实际应用中,包括数字图像处理的各种结果,差不多都采用彩印放大成彩色照片的方法。

彩色合成由于能将地物在不同波段上的信息以不同的色彩同时显示在一张图像上,与彩色等密度分割只能将单波段信息机械地按密度级作分色归并相比,不仅色彩层次丰富,而且地物的形态特征和内部结构细节也得以充分显示,因此,其影像增强的效果往往更好。

彩色合成的影像特点很大程度上取决于波段-滤光片组合。对于陆地卫星的MSS和TM来说,除了TM321^①为近似真彩色外,其他均为假彩色,故彩色合成常常被称作假彩色合成。但也可模拟生成似真彩色,如MSS564、TM543等。这主要是因为植被在MSS⁶和TM4上反射较高,置于绿通道时,合成图像上植被覆盖区都呈不同的绿色,看上去便很像真彩色。还有其他一些组合方案也可生成模拟真彩色,这里从略。需要指出的是,经验表明,由于MSS7和TM4波段受植被高反射的影响,图像的亮度水准一般比其他波段要高得多,因此,它们置于哪个滤光片通道,将决定合成图像总体偏于哪种彩色色调。

具体地物在不同波段-滤光片组合下呈现的色彩取决于其反射波谱曲线对应于不同波段上的反射率高低。例如,植物的近红外高反射峰使其在MSS7和TM4上亮度值特别高,透明正片上影像密度小,透过率高,因此该波段被置在哪个滤光片前,在承像面上这种色光便较强;相反,植被在MSS4、MSS5上反射均较低,所赋色光在承像面上也就较弱。

①321为R(红)、G(绿)、B(蓝)通道(滤光片)排序对应的波段,此处即TM3——红、TM2——绿、TM1——蓝组合,下同

其余类推。在透明正片加色法等量合成的情况下，几种主要地物类型不同波段-滤光片组合中的色彩表现（以MSS为例）见表4-1。

表 4-1 不同波段-滤光片组合的色彩表现

波段-滤光片组合				植 物	城 市	水 体	土 壤
MSS4	MSS5	MSS6	MSS7				
蓝	绿	绿	红	茶红	青	蓝	浅茶黄
	青		红	茶红	青	浅 蓝	浅 茶
	蓝		红	茶黄	蓝	浅 蓝	浅 茶
青			红	茶	绿	绿	浅 茶
蓝	红		绿	绿	紫红	深蓝紫	浅 黄
	品红		绿	绿	紫红	深紫红	浅 黄
红	蓝		绿	青	紫红	深茶红	浅 绿

（引自马荣斌，1982）

实践表明，其中MSS754（对于TM为TM432）是最常用的较为理想的组合，被称作是标准假彩色合成。在该类合成图像上，绿色植物呈红色影像：长势好的呈鲜红色，幼年植物带粉红色，水稻呈暗红色（系有水参与作用），遭受病虫害或雹灾等自然灾害的红色不纯，阔叶林的红色比针叶林饱和度高；清水、静水为黑色，含泥沙及杂质的水呈淡蓝色，特别高的呈乳白色，长有水生植物的水体略带红色或有红色斑点；基岩和土壤从浅蓝、淡绿到棕黄；城镇民屋表现为深蓝、蓝灰到黑色。在图版3上这些特点均清晰可见，而所有这些特点都可以从它们的波谱特征上得到合理的解释。

在作光学合成处理时，事先需制单波段的模片（黑白正片或负片），变换模片种类及其影像密度可取得不同的合成效果；同一套模片，改变其波段-滤光片组合以及改变各个波段的投光量（不等量合成），合成图像及各类地物的色彩表现也将发生明显的变化。因此，为了突出判别目标及取得不同的彩色增强效果，一般都要对模片和波段-滤光片组合进行反复的试验。充分考虑地物反射波谱特性与不同模片及波段-滤光片组合的对应关系是减少盲目性和顺利取得理想处理结果的关键。有关这方面的方法要领可参阅相关掩膜技术方面的论著（见本章参考文献〔3〕）。

三、其他光学图像处理

对遥感影像母片作不同的曝光处理可制成影像密度各不相同的正、负模片（拷贝）。同一地区可以有不同遥感器、不同波段以及不同时间等各种模片（相关模片）。对不同组合的相关模片作叠掩处理（相关掩模）可获得不同增强效果的新图像。上述彩色合成即是最常用的方法之一。此外，还常采用以下几种处理方法。

（一）反差增强

通常是利用高反差的感光材料和冲洗液作反复拷贝，来扩大原模片中的影像密度差异。它有利于增强一些低反差的地物影像，突出大的轮廓，也可使彩色合成获得更丰富的层次，但同时会丢失部分细节，故处理时要适可而止。

（二）边缘增强

取同一母片的正、负拷贝，使之精确重叠，当二片的冲印处理条件相同，由于密度相反，影像相互抵消；若将二者作微小错位，再作曝光冲印，地物边缘部分因密度差改变，

不再相互抵消而实现出来，呈现为一条亮线。这种方法可用来增强线性构造和地质体的形态轮廓，除了和错位方向平行的那一组线性特征外，其余方向都会得到增强。

(三) 光学比值增强

同一景图像二个不同波段的模片相掩，由于正模片的透过率 $T_{正} \propto \rho$ (地物反射率)，负模片 $T_{负} \propto \frac{1}{\rho}$ ，当取一正一负(如4波段为正片，7波段为负片)，经 i_0 光束照射(图4-5)，生成新图像的物理含义便为： $i_0 \cdot T_{4正} \cdot T_{7负} \propto \frac{\rho_4}{\rho_7}$ ，这种处理常具有消除原图像中部分干扰因素，突出某些地物的作用，从而达到一定的图像增强意义。

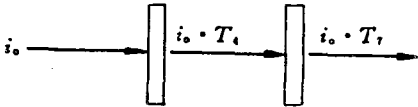


图 4-5 光学比值图像光学原理示意图
(引自陈华慧, 1984)

(四) 影像相减

同一地区前后两个时相、同波段但符号相反的模片相掩，假设两次成像的光照水准相同，则正、负相叠，影像相互抵消。但如果其中某一部分或某一地

物目标，前后发生了变化或位移，那末，这部分影像便不能抵消，而在四周未发生变化的背景中突现了出来。故这种方法适用于遥感动态研究。

四、光学变换处理简介

采用近代光学信息处理技术，是当前遥感图像处理的重要发展方向之一。

光学信息处理通常是利用薄透镜的二维傅里叶变换本领，以相干光(激光)或部分相干光(白光)，在光学信息处理系统中，对胶片图像作光学傅里叶变换，将空间域的图像转换成频率域的信息，然后通过“修改”频谱——滤波来达到图像的增强。故光信息处理的实质就是以傅里叶光学理论为基础的 optical 变换处理。其原理如图4-6。

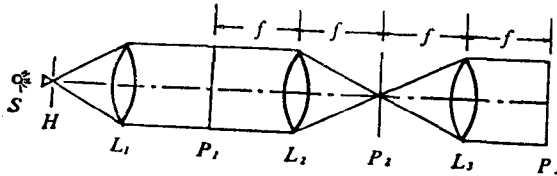


图 4-6 光学变换技术原理图

图中 P_1 为原图像， P_2 为经单色光源 S 照射后产生的傅里叶频谱， P_3 为 P_2 的反变换。如果对 P_2 的频谱不作修改， P_3 仅为 P_1 的倒像；当在 P_2 处置不同透过特性的透镜，令一部分频谱通过，而其他谱不通过，则 P_3 处生成的图像即为经滤波变换的像。按滤波透镜(图4-7)的性质及其增强效果，可分为：

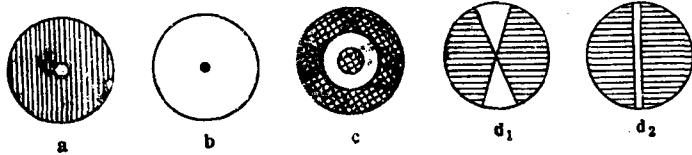


图 4-7 空间滤波器

(引自庄培仁, 1986)

a. 低通, b. 高通, c. 带通, d. 方向滤波器, d1. 扇形, d2. 狭缝

1. 低通滤波 其滤波器为一圆孔(图4-7a),能阻挡远离光轴的高频成分,使光轴附近的低频成份通过。它具有平抑细微结构,增强原图像中主干构造的作用。

2. 高通滤波 其滤波器(图4-7b)只对零频作适当衰减,以削弱背景、突出光密度突变的高频成份,起到增强边缘和细微构造的作用,也有助于隐伏构造的显示。

3. 带通滤波 不少地物有特定的空间频率,制作相应的带通滤波器(图4-7c),只让这部分频带通过,从而达到增强的目的。

4. 方向滤波 选用扇形(图4-7d₁)或狭缝(图4-7d₂)滤波器,只让垂直扇形中轴或狭缝方向的频谱通过,以抽取该方向的线性信息;改变扇形中轴或狭缝方向,便能增强不同方向的线性影像。故可用作线性构造增强。

以上四种均以改变频谱面上的振幅分布实施光信息变换,故称振幅滤波,或简单空间滤波。另外,还可以设置位相滤波器、光栅滤波器、匹配滤波器等。其中,光栅滤波既可增强不同方向的线性构造,也可实现图像加、减等数学运算,获得多种增强效果;匹配滤波主要用于图像识别,检测特定的目标信息。

此外,以白光(部分相干光)替代单色光源,改用彩色滤波器(半色调屏胶片——一种能将物平面上黑白图像的影像密度转换为空间频谱分布的光栅),经光学傅里叶变换后,在像平面得到的则是按原图像密度等级编码的彩色图像。这也称为光学编码,或光学假彩色频率编码,也是目前常用的光学变换处理方法之一。

光学信息处理具有容量大、能够进行二维平行处理和快速实现图像变换、卷积、相关等优点,在实际应用中已取得很好的效果,显示出有很大的潜力。但它也有自身的局限性,比如,不及数字图像处理灵活,处理系统本身不能作控制、分析、判断等。将光学信息处理的快速、大容量和数字图像处理的灵活、精度高结合在一起的光机混合处理,将是今后遥感图像处理的发展方向。

第二节 数字图像处理

一、数字图像处理的基本概念

(一) 数字图像

数字图像,又称数字化图像,是一种以二维数组(矩阵)形式表示的图像。该数组由对连续变化的空间图像作等间距抽样所产生的抽样点——像元(像素)组成,抽样点的间距取决于图像的分辨率或服从有关的抽样定律;抽样点(像元)的量值,通常为抽样区内连续变化之量物的均值化量值,一般称作亮度值或灰度值,它们的最大、最小值区间代表该数字图像的动态范围。数字图像的物理含义取决于抽样对象的性质。对于遥感数字图像,就是相应成像区域内地物电磁辐射强度的二维分布。

在数字图像中,像元是最基本的构成单元。每一个像元的位置可由行、列(x, y)坐标确定;亮度值(z)通常以0(黑)到255(白)为取值范围。因此,任何一幅数字图像都可以通过 X, Y, Z 的三维坐标系表示出。例如,陆地卫星的MSS图像(图4-8),便可看作 $x=2340$ (行), $y=3240$ (列), $z=0-255$ 的三维坐标系。TM、HRV等亦然,只是行、列数不同而已。

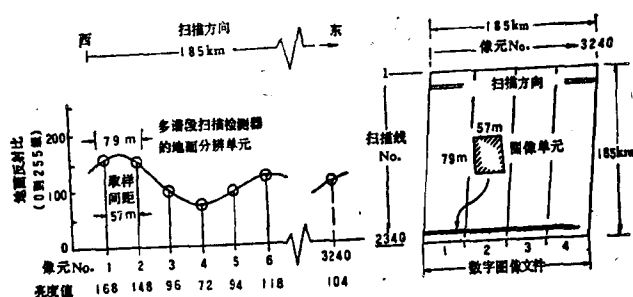


图 4-8 陆地卫星MSS数字图像的构成原理

(据F.F.Sabins, 1977)

左图：一条扫描线上亮度值产生原理显示

右图：图像坐标和像元参考系

数字图像可以有各种不同的来源：大多数卫星遥感，如MSS、TM、HRV、AVERR等等，地面景像的遥感信息都直接记录在数字磁带上，有关的接收系统（遥感卫星地面站、气象卫星接收站等）均可提供相应的计算机兼容数字磁带（CCT）及其记录格式。应用人员只要按记录格式将CCT数据输入计算机图像处理系统，即可获得数字图像，并进行各种图像处理；对于胶片影像，则可通过透射密度计、飞点扫描器、鼓形扫描器及摄像扫描器等，将影像密度转换为数值，进而形成数字图像；对于非遥感的地学图件，如地形图、地质图、航磁图、重力图、化探元素异常图等，也可通过数字化仪，转换为数字图像。同一地区不同来源的数字图像都可精确配准，并作复合处理。

与光学图像相比，数字图像量化等级高（256级）、失真度小、不同图像的配准精度高、传输及储存方便，尤为重要是可由计算机进行各种灵活、可靠、有效的处理，使遥感图像获得更好的判读、分析等应用效果。

（二）数字图像处理

数字图像以不同亮度值像元的行、列矩阵组织数据，其最基本的特点就是像元的空间坐标和亮度取值都被离散化了，即只能取有限的、确定的值。所以，离散和有限是数字图像最基本的数学特征。所谓数字图像处理，就是依据数字图像的这一数字特征，构造各种数字模型和相应的算法，由计算机进行运算（矩阵变换）处理，进而获得更加有利于实际应用的输出图像及有关数据和资料。故数字图像处理通常也称为计算机增强处理。

数字图像处理在算法上基本可归为两类：一类为点处理，即施行图像变换运算时只输入图像空间上一个像元点的值，逐点处理，直到所有点都处理完毕，如反差增强、比值增强等；另一类为邻域处理，即为了产生一个新像元的输出，需要输入与该像元相邻的若干个像元的数值。这类算法一般用作空间特征的处理，如各种滤波处理。点处理和邻域处理有各自不同的适应面，在设计算法时，需针对不同的处理对象和处理目标加以选择。

遥感数字图像处理，数据量一般很大，往往要同时针对一组数字图像（多波段、多时相等）作多种处理，因此，需要依据遥感图像所具有的波谱特征、空间特征和时间特性，按照不同的对象和要求构造各种不同的数学模型，设计出不同的算法，不仅处理方法非常丰富，而且形成了自身的特色，已发展为一门专门的技术。根据处理目的和功能的不同，目前遥感数字图像处理主要包括以下四方面的内容。

1. 图像恢复处理：旨在改正或补偿成像过程中的辐射失真、几何畸变、各种噪声以及

高频信息的损失等。属预处理范畴，一般包括辐射校正、几何校正、数字放大、数字镶嵌等。

2. 图像增强处理：对经过恢复处理的数据通过某种数学变换，扩大影像间的灰度差异，以突出目标信息或改善图像的视觉效果，提高可解译性。主要包括有反差增强、彩色增强、运算增强、滤波增强、变换增强等方法。

3. 图像复合处理：对同一地区各种不同来源的数字图像按统一的地理坐标作空间配准叠合，以进行不同信息源之间的对比或综合分析。通常也称多元信息复合，既包括遥感与遥感信息的复合，也包括遥感与非遥感地学信息的复合。

4. 图像分类处理：对多重遥感数据，根据其像元在多维波谱空间的特征（亮度值向量），按一定的统计决策标准，由计算机划分和识别出不同的波谱集群类型，据以实现地质体的自动识别分类。有监督和非监督两种分类方法。

遥感数字图像处理的过程和各部分内容的关系如图4-9。本节将从遥感地质应用的角度简要介绍其中几种常用的处理方法，有一些方法（如复合处理）将在有关的应用章节讨论。

数字图像处理既可在专用的图像处理系统上进行，也可自编程序在通用计算机或微机上进行；处理结果既可打印成数符图（图4-10），也可以在彩色显示器上作彩色显示；既可以输出单波段的黑白图像，也可以输出多波段合成或各种运算处理结果的彩色图像（参见图版③）；既可以内拍或扫描到胶片上成像，也可以外摄翻拍成像；既可以直接形成成果图件，给出各种统计数据，也可以再记录到CCT上转存……。总之，十分灵活、方便，比光学图像处理有更强的适应性，越来越得到广泛的应用。

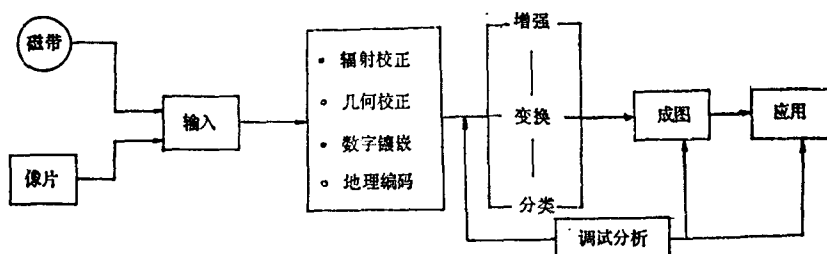


图 4-9 遥感图像数字处理基本流程

（三）数字图像处理系统

遥感数字图像处理不仅数据量大，而且数据传输频繁，专业性强，因此，一般都要在专门的处理设备上进行。用以进行数字图像处理的专门计算机设备及其功能软件即称之为数字图像处理系统，通由硬件系统和软件系统两大部分组成。

其中，硬件系统，按目前国内外的发展趋势可分为大型的专用机系统（如目前国内使用的I²S公司的S600系统）和微机图像处理系统两类。一般情况下，它们都包括以下一些基本的部件（图4-11）：

1. 主机：进行各种运算、预处理、统计分析和协调各种外围设备运转的控制中心，是最基本的设备。一般为速度快、内存大的计算机，如VAX-11、VAX-3600等。随着微机的内存日渐扩大、运算速度越来越快，已可以用微机取代，如PC386、PC486及各种工作站等。

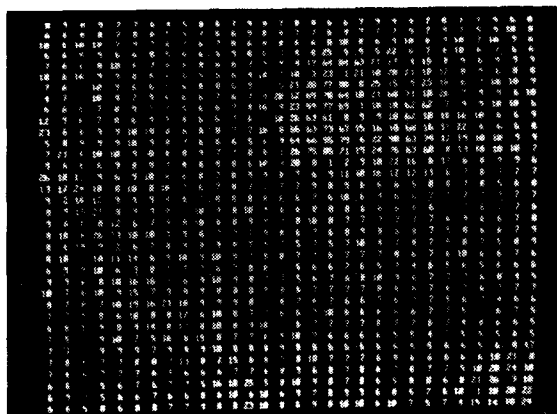


图 4-10 杭州三潭印月TM5波段数符图

2.磁带机和磁盘机：连结数字磁带(CCT)和主机的数据传输装置，既可以输入CCT数据，也可以将中间处理和最终处理的结果再转存记录到CCT上；对于微机系统，图像数据的传输一般用软磁盘，但对大数据量的卫星CCT则需用具微机接口的磁带机（如F880）；

3.图像处理器：数字图像处理专用的核心设备，既具体承担各种图像处理功能，如图像复原、几何校正、增强和分类等各种变换处理

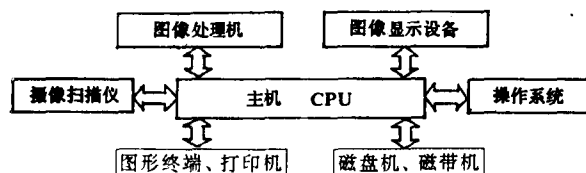


图 4-11 数字图像处理系统基本结构示意图

等等，也是主机和各种输出输入设备的纽带。就前者而言，它实际上是各种图像处理软件的硬件化。目前国内使用较多的M75图像处理器即是，它可以快速处理显示 512×512 或 1024×1024 的图像；对于微机系统，则可以用图像处理板（MVP-AT板）代替。

4.输出设备：用作处理结果的监视分析(彩色监视器或彩显)及记录、成图(包括宽行打印机、彩色喷墨打印机、绘图仪、胶片记录扫描仪等等)。

对于功能齐全的系统，除上述外，通常还包括有胶片影像的摄像或扫描数字化仪、图形数字化仪等输入设备。

软件系统系指与硬件系统配套的用于图像处理及操作实施的各种软件。一般包括系统软件和应用软件两部分。前者又包括操作系统和编译系统，主要用于输入指令、参数及与计算机“对话”；后者则是以某种语言编制的应用软件，存于硬件系统的应用程序库中，用户可按研究任务采用对话方式或菜单方式，发出相应的指令使用这些程序，由主机作运算处理，获得所需的结果。不同专业往往设计有各自的应用软件系统，故国际上已涌现出各种各样的软件系统，如JPL的VICAR系统、LARSYS系统等等；目前微机上也普遍采用C语言编程，也已开发了一系列的微机图像处理的应用软件。

二、图像恢复处理

图像恢复处理的目的是为进一步作增强或分类处理提供高质量的可供使用的图像数据，故也称预处理。有关地面接收站在向用户提供CCT磁带之前一般都作了例行(粗制)的恢复处理。遥感地质应用人员为了获得满足专业要求的处理效果和精度，有时还需要做以下几种恢复处理，使之成为“精制”的CCT数据：

(一) 大气校正

粗制CCT产品一般只对由遥感器本身引起的系统（辐射）误差作了校正，尚保留着主要由大气散射效应带来的辐射失真。校正处理时通常仅考虑瑞利散射的影响，以MSS为例，它在4、5波段较大，6波段次之，7波段最小（图4-12），故在实际处理中最简单的办法是先从MSS7上找出0值像元（阴影），然后将其它各波段的数值减去各自对应于MSS7 0值像元的亮度值数即可。但一般是分波段统计地物目标的亮度，分别与MSS7作二维对比图（图4-13(a)）；或者将各波段的直方图与MSS7直方图对比（图4-13(b)），相对于MSS7出现的偏移值a可视为大气散射的影响。经验表明，MSS4的订正值在9—13，MSS5为5—9，而MSS6为1—5，MSS7为0—3。

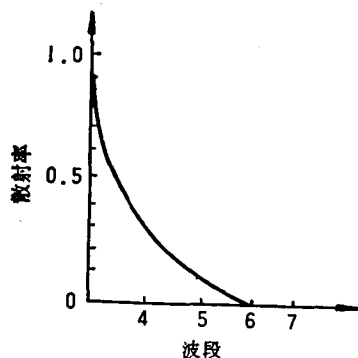


图 4-12 大气散射对MSS各波段的影响
(据许殿元, 1990)

大气校正会增加图像的对比度，消除雾霾感（短波波段尤甚），在做比值增强、彩色合成等处理时，事先做这种校正更为必要。

（二）几何校正

系指消除遥感图像在其形成过程中产生的各种几何位置失真（畸变）的图像处理过程。在粗制CCT产品中通常已对由遥感器本身和地球自转造成的系统几何畸变作了例行校正处理（习称粗纠正），因此，遥感地质人员需要做的，主要是对CCT中残存的非系统（随机）畸变的纠正（习称精纠正）。

数字图像几何精纠正的实质是逐像元地将其图

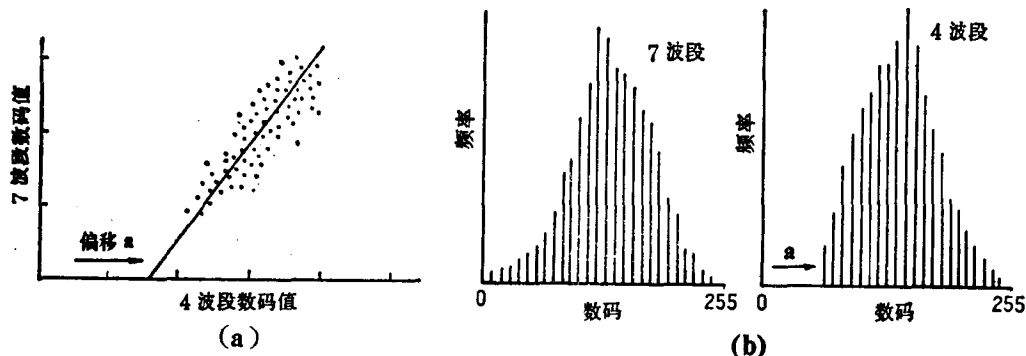


图 4-13 MSS数字图像上确定大气校正值a的方法

(据F.F.Sabins, 1977)

(a) 二维对比图法；(b) 直方图对比法

像坐标按一定的精度要求变换到地形图的地理坐标系中，然后再按恰当的抽样方法对像元重新作亮度赋值。进行图像与地形图的坐标变换，首先要选定一批在二者中都容易识别的同名点作控制。以控制点所提供的两组坐标数据，采用回归方法就可以建立两个坐标系之间的转换函数，确定转换系数矩阵。目前最常用的是二元N阶多项式，一般表达式为：

$$\begin{cases} v = \sum_{p=0}^N \sum_{q=0}^{N-P} a_{pq} x^p y^q \\ \mu = \sum_{p=0}^N \sum_{q=0}^{N-P} b_{pq} x^p y^q \end{cases} \quad (4-1)$$

其中, v 、 u 是遥感图像中的像元坐标, x 、 y 是配准到地形图后输出新图像中的像元坐标, N 为阶数, N 值越大, 说明几何歪曲越复杂。 a 和 b 为转换系数, 其值由选用的控制点坐标通过回归方法确定, 一般用最小二乘法通过地面控制点数据进行曲面拟合求得。

输出新图像的像元尺寸不一定与原图像一致, 故处理时应预先提供原图像坐标原点(左上角)的经纬度, 以及新像元的尺寸。新像元的亮度值通过重采样获得, 常用的方法有最近邻点法、双向线性内插法、三次褶积法等。其中, 最近邻点法计算简单, 但误差较大; 三次褶积精度高, 但运算量大; 双向线性内插法居中, 具体可视工作要求选定。

几何精纠正直接以地形图(地理坐标)为参照, 综合校正所有因素造成的几何畸变, 能显著改善数字图像的几何精度, 不仅对后续的解译制图和几何量算是非常必要的, 而且它也是不同图像的配准和多元信息复合的基础。因此, 提高纠正处理本身的精度就显得很重要了。关键是选准几何控制点, 要尽量挑选那些位置准确、与周围差异显著、且范围窄小的影像, 最好是孤立的像元。如河流的干、支流交汇点、拐流点、独立的小水体、特征明显的地形点、坡折点等等。由于水在近红外反射极低, 数字图像上亮度几乎为零, 易于确定, 所以应多利用近红外波段的图像(MSS7、TM4、TM5、TM7等)来选控制点。控制点的数目要适中、在图像上分布要均匀, 位置精度一般应小于0.5个像元。

此外, 诸如TM之类粗制数字磁带, 本身几何精度尚较高, 如已能满足研究的精度要求, 也可以采用整体旋转坐标轴, 使图像方位指向正北的办法作几何校正。

(三) 数字镶嵌和数字放大

数字镶嵌是指将相邻且互有重叠的两幅或数幅CCT数据, 拼接生成一个在几何形态上和色调分布上协调一致, 统一为一个整体的新图像(数据)文件的处理过程。通常涉及两项关键技术: 一是相邻图像的几何配准, 一般通过先在两幅图像的重叠区选取同名点像元作几何控制点, 然后以其中一幅为准, 对另一幅作类似于上述几何精纠正来实现; 另一是相邻图像之间的色调和反差调整, 一般采取先对两幅图像的重叠区作均值、方差或直方图匹配, 而后根据求出的匹配系数, 以一幅为准, 调整另一幅图像的反差, 使二者色调均衡。经依次几何配准和反差调整后, 裁去重叠区其中一幅的重复像元, 并对各接边作适当平滑调整, 按统一的数据文件形式输出, 即成。

数字镶嵌可以较好地克服常规卫片镶嵌图往往呈现为色调不一的棋格块状, 以致严重干扰判读解译的缺陷, 对于宏观地质分析(油气盆地、区域构造带)或研究区跨越不同图像是非常必要的。为了取得满意的镶嵌效果, 相邻图幅的CCT数据, 时相应尽可能接近, 允许镶嵌多少个图幅, 很大程度上取决于主机的容量和图像种类(数据量), 有时为了制作大范围的数字镶嵌图, 可能要采取间隔采样或信息压缩技术来减少数据量。

彩色图版④是塔里木地区57幅TM的数字镶嵌图像, 已看不出是多幅图像镶嵌而成。

数字放大实际是数字图像的采样点内插加密, 即逐行逐列地在原图像的相邻像元中间等量插入新像元, 并按一定的插值原理(最常用的是双线性内插法)对其作亮度赋值。通过插值, 该图像的采样点密度成倍增加。如图4-14所示, 行、列各内插一个像元, 使原为4个像元(黑点)的图像变成了 $4 \times 4 = 16$ 个像元的新图像。此时, 由于新图像对应于地面的大小并未改变, 只是像元密度增加了一倍, 于是像元的地面分辨率提高了一倍(原来一个像元被分成④个), 从而起到了图像“放大”的作用。

数字放大主要用于制作大比例尺的卫星像片。如TM图像经数字放大处理后制成1:

5万(常规一般为1:10万)的卫片仍有较高的影像清晰度。但需强调的是,其作用仅仅是改善像质,实际上并未增加信息。

以上从遥感地质应用的角度介绍了几种图像恢复处理。最后,还需说明一点,在作这些处理之前,要事先检查得到的CCT磁带数据是否有扫描线脱落等坏带现象,如有,则需先作去条带处理(一般也是通过上、下行线性插值等方法进行)。不然,将影响后续处理结果。

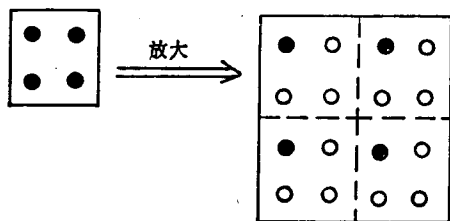


图 4-14 数字放大示意图

(引自许殿元, 1990)

三、图像增强处理

近年来,数字图像处理发展迅速,各种增强的方法层出不穷。以下仅介绍对地质应用较为有效的几种方法,其他方法可参考已出版的遥感数字图像处理的著作[3, 4]。

(一) 反差增强

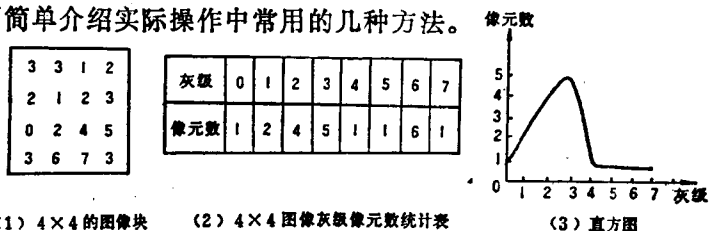
数字图像,从理论上讲,亮度取值范围可从0—255,但实际图像由于成像系统的特性、成像时的光照条件、以及像幅范围内地物间辐射差异的大小等各种原因,常常使大部分像元的亮度集中在比较窄的动态区间,致使图像的反差较小、色调单一(过“黑”或过“白”),难以从中区分出更多的地物信息,于是,改善和提高图像的对比度——反差增强,便成了数字图像增强首先遇到的一个问题。

反差增强也称反差扩展,或拉伸增强,是一种通过拉伸或扩展图像的亮度数据分布,使之占满整个动态范围(0—255),以达到扩大地物间亮度差异,分辨出尽可能多的亮度等级的一种处理技术。数字图像的亮度分布,一般可用一幅图像中不同灰级(亮度)像元所占的比例——直方图来表示(图版25)。图4-15显示了一块占有8个灰级(0—7)的4×4小图像的直方图生成过程。可以看出它实际上是一种亮度分布函数(曲线)。反差扩展归根到底就是通过改变这种分布曲线来达到增强的目的。

在反差扩展中,输出的像元值 y ,是输入的像元值(原图像) x 的函数:

$$y = f(x) \quad (4-2)$$

按照函数关系的不同可有不同类型的扩展(见图4-16)。在处理方法上可以分为两类,一类是使用函数变换对每个像元点进行变换处理,常用于有确定拉伸对象(地物目标)的情况下;另一类是改变像元间的亮度结构关系,即通过直方图调整改变图像的亮度结构。下面简单介绍实际操作中常用的几种方法。



(1) 4×4 的图像块

(2) 4×4 图像灰级像元数统计表

(3) 直方图

图 4-15 直方图制作示意图

(引自许殿元, 1990)

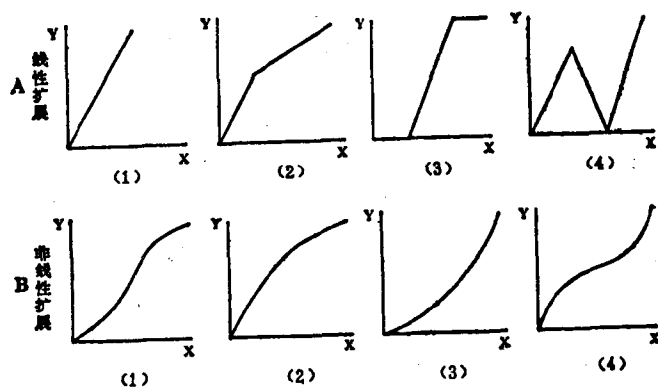


图 4-16 几种反差扩展

(引自陈华慧《遥感地质学》，1984)

线性扩展(1)简单线性扩展, (2)分段线性扩展, (3)局部线性扩展, (4)多级线性扩展

非线性扩展(1)中部扩展(高斯、拉平、正弦扩展等)、(2)暗部扩展(对数扩展),

(3)亮部扩展(指数扩展), (4)两端扩展(正切扩展)

1. 线性扩展

将原图像中像元的亮度按线性关系扩大, 亮度扩展的范围可任意给定, 具体应用时可选择图4-16A中各种不同的形式。一般来说, 对整幅图像作全面而均匀的拉伸, 可用简单线性扩展(图版27); 当需要对某一灰度范围进行增强, 可采用分段扩展。按给定的分段界限的不同, 可扩展直方图中的任何一部分, 但这种方法往往会造成分段点两侧亮度陡变, 若分段点选择不当, 还会歪曲地物的波谱特征, 故在实际工作中应慎用。

2. 非线性扩展

对原图像亮度区间的各个部分按非线性关系作不均等扩展。通常是对亮区和暗区分别给以不同的扩展比例。例如, 采用对数变换可使图像的暗区(如大片阴影、大面积植被覆盖)得到扩展, 而亮区受到压抑; 相反, 若扩展亮区, 则要采用指数变换。在干旱区, 平原、盆地的亮度值普遍偏高, 影像单调, 经指数扩展, 常可从中分出一些层次。此外, 还可作正弦、正切等扩展(图4-16B)。

3. 直方图调整

通过改善图像的总体亮度结构(直方图形态)来达到图像增强的目的。其原理是, 以一变换函数 $S = T(r)$, 作用在原图像的直方图 $P_r(r)$ 上, 使之变成具有某种特定亮度分布形态的直方图 $P_s(s)$ (图4-17), 并根据 $P_s(s)$ 变更原图像各像元的亮度值。一般来说, 这种方法着重于扩展高频数亮度值之间的间隔, 使直方图中部所包含的地物反差显著增强, 而有利于地质体的区分。常用的直方图调整方法有直方图均衡化和直方图正态化等。图版28即为直方图均衡处理的结果。

反差扩展是针对单波段的一种图像增强处理, 使用得当, 可明显改善像质, 提高图像的对比度(参见图版26和27、28)。在作彩色合成等多波段的增强处理时, 一般都要先对各个波段的数据作适当的拉伸, 以获得理想的彩色增强效果。因此, 它也是其它增强处理的基础和先导。从这个意义上说, 它还具有预处理的作用。

(二) 彩色增强

数字图像的彩色增强处理也可以有单波段图像的伪彩色处理和多波段图像的彩色合成

两个不同的途径：

1. 单波段图像的伪彩色增强

对于单波段图像生成伪彩色最简单的方法是彩色密度分割，其原理与光学密度分割一致，但比光学密度分割灵活、方便，可分割的等级也更细，并且光谱意义也更明确。一个数字图像系统可以说是性能更优越的彩色等密度分割仪。与光学分割一样，它对于有着递变规律的地表景物的显示十分有效，有时也能显示出一些细节变化。但在数字图像处理中，它主要是用于检测单波段图像的亮度值变化趋势信息，为后续处理提供参考。

另一种单波段伪彩色处理方法是伪彩色合成。它是对单波段的CCT数据通过加色比例变换函数把黑白灰级变换为红、绿、蓝彩色级，然后再加色合成（图4-18），生成伪彩色图像。由于这种图像能把单波段上不易区分的细微灰度变化映射成不同的色彩，因此比彩色密度分割有更好的快速检测单波段图像灰度变化信息的效果。

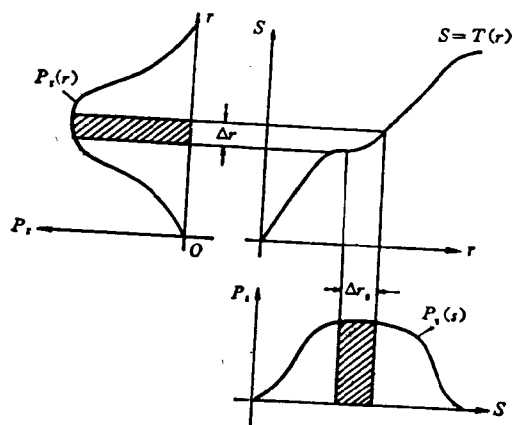


图 4-17 直方图调整图
(据李铁芳, 1987)

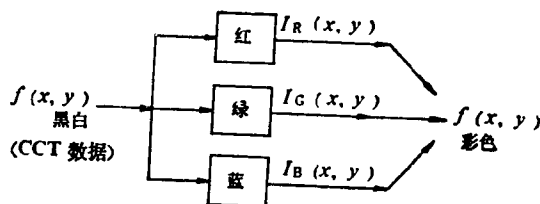


图 4-18 伪彩色合成示意图
(引自许殿元, 1990)

2. 多波段图像的彩色合成

与光学图像处理相仿，数字图像的单波段彩色增强照例不足以揭示多波段遥感中地物在不同波段上丰富的波谱特征信息。为了发掘多波段数字图像的信息优势，提高图像的解译判读效果，同样可采用彩色合成。其基本的方法原理与单波段伪彩色合成类同，只是红、绿、蓝变换不是对同一波段，而是分别对三个（或二个）波段实施，即由三个（或二个）波段的CCT数值根据设定的波段灰度与彩色之间的变换关系表，直接控制图像处理系统中彩色显示装置的红、绿、蓝三色枪的光强输出，加色合成显示在彩色屏幕上，形成彩色图像（图4-19）；或者以三色依次扫描到彩色胶片上，再印放成彩色像片。目前这类处理不仅可在专用图像处理机上实现，而且已可在微机上借助图像处理板实现，甚至在TVGA图形卡的支持下通过彩色模拟程序在微机上完成。后者受TVGA卡只能显示256色的限制，色彩尚不尽丰富，但一般的合成显示是能胜任的。

与光学处理相比，数字图像的彩色合成不仅省却了制作单波段黑白胶片影像的过程，也避免了胶片拷制过程中的信息丢失，而且由于CCT的量化等级高达256级，远远高于黑白影像可分辨的灰度变化，因此其色彩层次往往比光学合成要丰富得多，同时，在计算机图像处理系统中，各个波段的数据可以十分方便地作各种拉伸变换（反差扩展），显示器

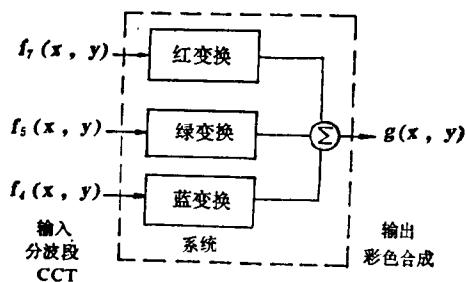


图 4-19 数字图像彩色合成示意图
(引自许殿元, 1990)

上的跟踪球还可任意调节色彩变化,从而能快速获得不同增强效果的彩色图像,比起黑白胶片需要通过影像拷贝来改变影像密度要方便、灵活得多,显示出更大的优越性。

在数字图像处理中,彩色合成通常是最常用、最基本,往往也是最便捷有效的增强处理方法。其影像增强的效果与光学合成处理相类似,照例可分为真彩色、似(模拟)真彩色、假彩色等不同的种类,

不同的波段—色通道(相当于滤光片)组合方案具不同的色彩及地物增强效果;充分利用地物波谱特征(曲线),选择合成方案同样是取得理想增强效果的关键。由于这些内容在光学彩色合成中已有较详论述,这里不再重复。

尚需指出的是,数字图像的彩色合成目前已不仅仅针对不同波段进行,而且还可以用不同的数字处理结果(如比值、KL变换的不同分量等)作输入图像,获得全新含义的合成图像(如比值合成图像);更进一步,已可以将非遥感的地质信息(如物、化探数据)通过彩色坐标变换(IHS变换)转换成R、G、B分量,作为输入图像,制成多元信息复合的彩色合成图像。因此如何选择波段或分量进行彩色合成是一个重要问题。目前常用OIF值作为衡量合成方案优劣的因子,它的基本原理是根据图像的统计特征来选定,就理论而言,OIF值越大,则合成方案越佳。

OIF可用下式计算:

$$OIF = \sum_{i=1}^3 \left| S_i \right| / \left| \sum_{i=1}^3 r_i \right| \quad (4-3)$$

其中 S_i 为第 i 波段的亮度标准差,标准差越大,表明该图像包含信息量越大, r_i 为合成分量间的相关系数,相关系数越小,表明图像间的冗余度越小。

现以某地一个实例说明,先计算TM各波段(TM6波段除外)的标准差,分别为:17.02, 10.29, 14.04, 15.95, 31.38, 19.36。6个波段间的相关系数如表4-2。

表 4-2 TM 图像各波段相关系数表

TM	1	2	3	4	5	7
1	1.0					
2	0.981	1.0				
3	0.975	0.992	1.0			
4	0.432	0.539	0.501	1.0		
5	0.801	0.848	0.845	0.765	1.0	
7	0.916	0.933	0.937	0.590	0.948	1.0

这样可以计算出不同合成方案的OIF值:

TM145: 32.22; TM345: 29.08;

TM457: 28.96; TM147: 26.97;

TM245: 26.78; TM157: 25.42。

在实际应用中,直接使用OIF因子,效果不一定理想,还应从应用目的出发,进行

波段的选择。

(三) 比值增强

比值增强是最为常用的一种运算增强方法^①。它是通过不同波段的同名像元亮度值之间的除法运算,生成新的比值图像来实现的。对于多波段数字图像,可以有多种不同的比值:

1. 基本比值

纯以两个波段的数值相比,故也称简单比值。用 $g_k (k=1, 2, \dots, N)$ 代表一个多波段图像(N 为波段数),任一比值图像可表示为:

$$R_{ij} = a \frac{g_i}{g_j} + b, i \neq j \quad (4-4)$$

其中, a 和 b 是调节参数。由 N 个波段可得出的比值数目为 $P = N(N-1)$,如TM图像,除TM6(热红外)之外,共可组成30种比值;

2. 和差组合比值

由两个波段的和与差构成的比值,如:

$$\frac{b_i - b_j}{b_i + b_j}, \frac{b_i - b_j}{b_i} \text{ 或 } \frac{b_i - b_j}{b_j}$$

3. 交叉组合比值

由3个或更多的波段构成的比值。其中分子和分母所包含的波段是不同的,如:

$$\frac{b_i + b_j}{b_k} = \frac{b_i}{b_k} + \frac{b_j}{b_k} \quad (4-5)$$

4. 标准化比值

由单个波段与所有波段之和构成的比值,即

$$R_i = \frac{b_i}{\sum_{j=1}^n b_j} \quad (4-6)$$

其中, $i=1, 2, \dots, N$ 。如MSS图像,常使用4、5、7三个波段,则可构成:

$$\frac{b_4}{b_4 + b_5 + b_7}, \frac{b_5}{b_4 + b_5 + b_7}, \frac{b_7}{b_4 + b_5 + b_7}$$

上述四种比值以基本比值和标准化比值更为常用。

比值处理简便易行,而且对地质信息尤为敏感,因而现今基本上已成为遥感地质研究中广为应用的例行处理方法之一。其基本功用在于:

(1) 能扩大不同地物之间的微小亮度差异,有利于岩石、土壤等波谱差异不太明显的地物的区分,也可用于植被类型和分布的研究。例如,铁帽与植被在单波段上不易区分,而通过MSS5/4和MSS7/5二维比值分析,明显区分了出来(图4-20)。

(2) 消除或减弱地形等环境因素的影响。例如,某地砂岩在阳坡和阴坡有不同的亮度,但在MSS4/5上,比值却非常接近(表4-3),因此消除了地形的影响(参见黑白图版29)。

(3) 提取与找矿有关的专题信息。例如含羟基的粘土矿物在 $2.2\mu\text{m}$ 附近存在有强吸收,故在TM7上为低亮度,而在TM5上它仍为高亮度,因此TM5/7常被用来提取与粘土化

①运算增强有和、差、积、比四种方法,另一种较常用的是差值增强,适于动态研究,详见第12章

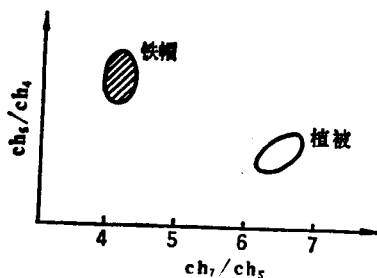


图 4-20 比值分布示意图

(据李铁芳等, 1980)

表 4-3 不同光照条件下砂岩反射比

光照情况	波段 4	波段 5	比值 4/5
阳 坡	28	42	0.66
阴 坡	22	34	0.65

(据 F. F. Sabins, 1977)

有关的矿化蚀变信息; 再加 $0.48\mu\text{m}$ 是铁离子电荷转移强烈吸收的位置, 故用 TM 5/1 利于提取与铁矿物有关的信息。

(4) 比值合成增强岩性及蚀变岩信息

以若干个比值图像作为输入图像, 进行假彩色合成, 在输出的彩色合成图像上常能有效地增强岩石的波谱信息差异。例如, 在我国铜陵地区采用 TM4 (R)、5/4 (G)、5/2 (B), 4 (R)、5/2 (G)、4/3 (B) 等方案制作的比值合成图, 有效地圈定出了志留系地层、岩体、大理岩化等岩性信息。在河北迁安地区利用 MSS 的标准化比值制作的合成图像上区分磁铁矿石及围岩也取得好效果。

比值增强生成比值图像后, 原来的独立波谱意义就不存在了。由此也给它带来一个很大的缺陷, 就是丢失了地物总的反射强度 (反射率) 信息。例如, 暗色的岩石和浅色的岩石之明显差异也被损失; 由于压抑了地形信息, 其作为地质解译的一个重要标志也被损失。为了弥补此不足, 通常采用一个波段的原图像与 (两个) 比值图像作彩色合成的办法; 此外, 比值有可能增加噪声, 而大气散射也会给比值结果带来干扰, 因此, 处理前更要注意做消条带和大气校正。

(四) 卷积增强

地物的边界及各种线性形迹, 通常都表现有一定的空间分布频率, 因此, 可以通过空间域或频率域的滤波对它们进行增强。其中, 卷积处理就是比较简便有效而最常使用的空间滤波方法之一。

与前述几种增强不同, 卷积增强是一种邻域处理技术。它是通过一定尺寸的模板 (矩阵) 对原图像进行卷积运算来实现的。以 3×3 (像元) 的模板为例, 其处理过程如图 4-21,

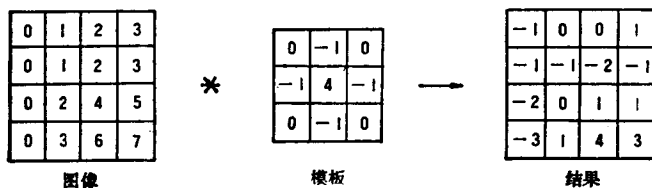


图 4-21 空间卷积

(据冯纪武, 1991)

即相当于把模板逐次放在每一个像元上, 计算模板元素和对应像元亮度值的乘积和, 用数学式可表示为:

$$f = \sum_{i=1}^9 m_i g_i = m_1 g_1 + m_2 g_2 + \cdots m_9 g_9 \quad (4-7)$$

式中, m_i 为模板元素值, g_i 为相应图像中各像元的亮度值。f 为卷积值, 亦就是滤波后 (模板)

中心像元的输出值。

增强不同方向的边界(或线性体),则是按一定的排列方向来分配模板中各元素的权系数。例如图4-22(a)、(b)、(c)、(d)便是分别对水平(相当于遥感图像的扫描线方向)、45°、垂直、135°四个方向进行增强的一组3×3模板。改变模板尺寸(5×5、7×7……等等)和板内元的差值可产生不同的效果。一般,模板越大、差值越大,对低频的粗大构造形迹的增强越明显,而高频信息(小断层、节理裂隙等)增强的幅度越小。模板可设计成不同的增强方向,但模板元素的数目均应为奇数;一般最大为15×15,模板尺寸太大,则其计算量也大,而卷积效果也不一定好。

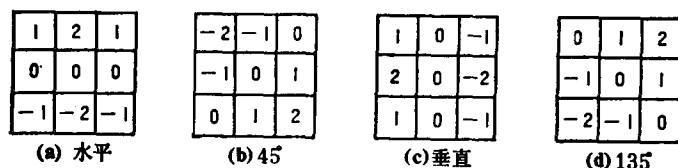


图 4-22 方向模板

(据陈华慧, 1984)

卷积增强对于突出某一方向的地质体边界和线性断裂构造或形迹常具明显的效果(图版30),对一些环形构造或线迹也会起到增强的作用,因此在遥感地质研究中被广泛使用。

(五) K-L变换

K-L变换是多波段遥感图像变换增强的常用方法之一,通常也称主组分分析或主成分分析。在数学含义上,它是一种基于图像统计特征的多维正交线性变换。经这种变换后生成一组新的组分图像(数目等于或小于原波段数),是输入的若干原图像的线性组合,即:

$$Y = TX \quad (4-8)$$

其中, X 是原多波段图像的数据矩阵,矩阵元素为 p 个波段的像元值向量; Y 是输出的主组分矩阵,即 q 个组分的像元值向量,一般 $q \leq p$; T 为变换核矩,通常为由变换波段之间的协方差矩阵所产生的特征向量矩阵。在 $p=3, q=4$ 的情况下:

$$\begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} t_{11} & t_{12} & t_{13} & t_{14} \\ t_{21} & t_{22} & t_{23} & t_{24} \\ t_{31} & t_{32} & t_{33} & t_{34} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{pmatrix} \quad (4-9)$$

或者

$$y_1 = t_{11}x_1 + t_{12}x_2 + t_{13}x_3 + t_{14}x_4 \text{——第一主组分}$$

$$y_2 = t_{21}x_1 + t_{22}x_2 + t_{23}x_3 + t_{24}x_4 \text{——第二主组分} \quad (4-10)$$

$$y_3 = t_{31}x_1 + t_{32}x_2 + t_{33}x_3 + t_{34}x_4 \text{——第三主组分}$$

y_1, y_2, y_3 按协方差矩阵的特征值大小依次排序。

从几何意义上讲, K-L变换相当于空间坐标的旋转。图4-23表示了一个二维空间坐标变换。图中 X_1, X_2 表示两个波段的像元值,黑点为相应的数据域。K-L变换相当于坐标轴旋转一个 θ 角,把数据域变换到 Y_1, Y_2 的新坐标系上,即:

$$\begin{pmatrix} Y_1 \\ Y_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\theta & \sin\theta \\ -\sin\theta & \cos\theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X_1 \\ X_2 \end{pmatrix} \quad (4-11)$$

图4-23表明, K-L变换后,第一主组分(Y_1)取得最大的信息量(可达90%左右),其余依次减小。一般情况下,一、二、三主组分基本上已集中了绝大部分的信息,后面组

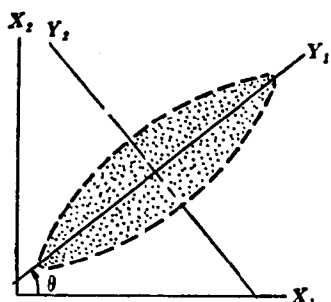


图 4-23 两个波段（或其他变量）
情况下的主组分变换
（引自陈华慧，1984）

分包含的信息量往往已非常小。因此，K-L变换一个最基本的功能就是，可以在信息损失最小的前提下，减少变量数目、降低数据维数，起到数据压缩的作用。这对多波段遥感特别有意义，因为它们通常为多变量，数据量也很大（一个TM波段达42兆），随着波段数越来越多和地面分辨力越来越高，还将更大（所谓“海量数据”）。

一般认为，K-L第一主组分基本上反映了地物总的辐射差异，其它组分则能够揭示地物的某些波谱特征。由上图可以看出，各组分之间互相“垂直”，即不相关。这就使K-L变换还具有分离信息、

减少相关、突出不同地物目标的作用。因而，在用K-L不同组分作假彩色合成时，往往可显著提高彩色增强效果，会有助于岩类的区分。但要注意的是，各组分的地质应用价值不能依它们的排序（即方差的大小）来确定。例如，MSS的K-L变换中，有时第四主组分反而比第三主组分区分岩性的作用更大。

在实际应用中，也常用比值或差值图像，以及与原图像合在一起作K-L变换。这对于提取某些专题信息会特别有用的。一个典型的例子是，TM5/7可提取与粘土化有关的矿化蚀变信息，但植被的TM5/7比值常常也很高，以致前者的信息往往被淹没在后者的“汪洋大海”之中，我国南方地区尤甚。然而，TM4/3恰主要只反映植被信息，因此，当用TM4/3、TM5/7作K-L变换，其第一主组分便集中了两个比值的基值——植被信息，而蚀变信息被分配到第二主组分中，这就把二者分离开了，进一步在第二主组分中提取蚀变信息（图4-24），效果便显著提高。此法已在南方某银铅锌矿区取得了很好的效果。

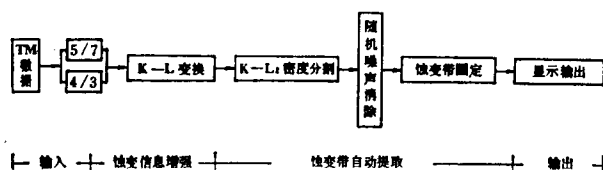


图 4-24 我国南方某地蚀变带信息提取的程序框图

与K-L变换相类似的另一种线性变换方法是近年来发展起来的K-T变换。缘于在MSS和TM数据空间中植被光谱随时间变化的轨迹构成一个“缨帽”的图形，故亦称“缨帽变换”。该变换有助于分离（提取）植被（绿度）和土壤（湿度）等信息，已引起人们的兴趣。有关这一变换的论述可参见文献[3]。

（六）IHS变换

在色度学中，存在有两种彩色坐标系统：一是由红（R）、绿（G）、蓝（B）三原色构成的彩色（RGB）空间；另一是由亮度（I）（或称明度、强度）、色调（H）、饱和度（S）构成的色度（IHS）空间（亦称孟塞尔坐标）。这两个系统的关系可用图4-25表示，此时，IHS的范围呈现为一圆锥体，在垂直于IHS圆锥轴的切面上，二者则呈现为图4-26所示的关系。该图中，I轴垂直于纸面（过S=0，白光点），沿I轴只有亮度明暗（白—黑）差异；圆周代表H的变化，并设定红色为H=0；半径方向代表饱和度，圆

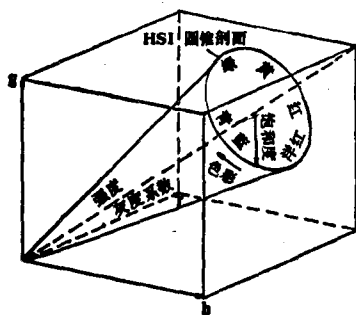


图 4-25 强度、色度(彩)与饱和度(IHS)和红、绿、蓝(RGB)空间关系示意图

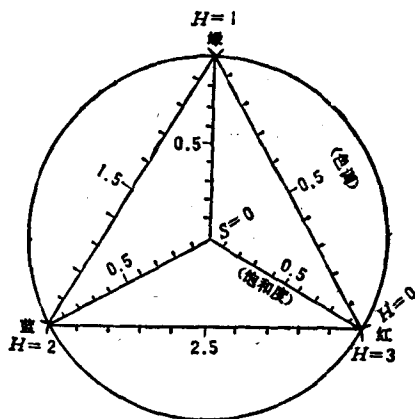


图 4-26 通过垂直IHS圆锥切面表示IHS与RGB的关系

心处 $S=0$ ，为白色(消色)，圆周处 $S=1$ ，彩色最纯。

很明显，这两个坐标系之间可以互相转换，这种转换即称为IHS变换，或彩色坐标变换(也称孟塞尔变换)。通常把RGB空间变换到IHS空间称之为正变换，反过来，由IHS变换到RGB称反变换。

当不直接采用三原色成分(R 、 G 、 B)的数量表示颜色，而是用三原色各自在 R 、 G 、 B 总量中的相对比例 r 、 g 、 b 来表示，即：

$$r = \frac{R}{R+G+B}, \quad g = \frac{G}{R+G+B}, \quad b = \frac{B}{R+G+B} \quad (4-12)$$

$$r+g+b=1$$

此时，如 $g=b=0$ ，则 $r=1$ ，为红色；白色($r=g=b$)则为 $W(\frac{1}{3}, \frac{1}{3}, \frac{1}{3})$ 。两个坐标系之间的转换关系，可简化为：

$$\text{正变换: } \begin{cases} I = R+G+B \\ H = (G-B)/(I-3B) \\ S = (I-3B)/I \end{cases} \quad (4-13)$$

$$\text{反变换: } \begin{cases} R = \frac{I}{3}(1-2S-3SH) \\ G = \frac{I}{3}(1-S-3SH) \\ B = \frac{I}{3}(1-S) \end{cases} \quad (4-14)$$

把 R 、 G 、 B 和 I 、 H ($0-3$)、 S ($0-1$)值扩展到 $0-255$ 数据域，设计相应的程序，在数字图像系统上便能自如地实现相互间的转换和显示。

目前在遥感数字图像处理中，IHS变换多用于以下研究。

1. 彩色合成图像的饱和度增强

当用以合成的三个原始图像相关性较大时，常规处理往往合成图像的饱和度会不足，色彩不鲜(纯)，像质偏灰，且较模糊、细节难辨(彩版3-4)。通过IHS变换，在IHS空间中增强(拉伸)饱和度 S ，用反变换求 R 、 G 、 B 进行彩色显示(图4-27)，则可显著改善图像的颜色质量和分辨能力(图版5, 6)。

2. 不同分辨率遥感图像的复合显示

直接把不同分辨率图像输入R、G、B通道作彩色合成复合显示,即使几何配精度很高,也难以获得清晰的图像(低分辨率图像使像质模糊)。采取将最高分辨率图像置作“*I*”、次高置作“*H*”、低分辨率置作“*S*”,然后反变换,求出R、G、B作复合彩色显示,则基本可使合成图像保持有高分辨图像的清晰度。对TM(常取其中两个波段)和SPOT(常取全色波段)图像作此种复合,既可获得SPOT的高分辨率,又可充分利用TM丰富的波谱信息。

3. 多源数据综合显示

采用常规方法对遥感图像与物化探等地质数据作综合处理,不但极不方便,充其量也只能把等值线叠合到遥感图像上。将物探(航磁、重力等)或化探(元素异常)信息数字化,分别置作“*H*”或“*S*”,以遥感图像(取一个波段)为“*I*”,作IHS的正反变换(图4-28)便可获得色彩分明的遥感与物化探信息复合的彩色图像。这类图像通常既具遥感图像清晰的地貌、地质背景,又能将物化探信息准确地反映在这一背景上,十分有利于它们相互关系的综合分析和解释(图版20)。

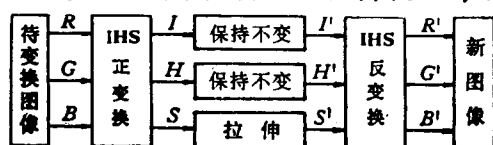


图 4-27 饱和度增强处理流程图
(据赵元洪, 1990)

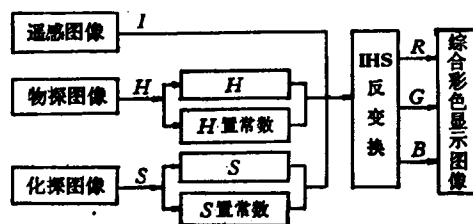


图 4-28 多源数据综合显示框图
(据赵元洪, 1990)

四、图像分类处理简介

数字图像的恢复、增强,乃至复合处理,归根到底只是改善图像的品质,提高图像的可解译性。但处理系统(计算机)并未对图像上地物的类别作出“判决”(解译)。由计算按一定的判别模式来自动完成这一“判决”,便是图像分类处理的过程。

图像分类处理的最终目标是智能化,使遥感图像处理发展成为一种人工智能系统。广义的分类处理,既包括波谱信息的分类,也包括空间信息的分类。后者一般包括图形识别、边缘和线条信息的检测与提取,以及纹理结构分析等,通常也称图像的空间信息分析。关于这一部分对于地质工作者显然感兴趣的内容,可参阅文献[3]等著作。限于篇幅,这里仅介绍按波谱信息分类的基本概念。

(一) 图像分类的依据

一般来说,同一类地物有着相似的波谱,在多波段遥感的数字图像中,可以粗略地用它们在各个波段上的像元值的连线(亨利曲线)来表示(图4-29A);由于受光照条件、环境背景等因素的影响,在实际的多维波谱空间中,它们的像元值向量往往不是一个点,而是呈点群分布(集群),不同地物的点群处在不同的位置(图4-29B);不仅如此,在实际图像中,不同地物的波谱集群还存在有交叉过渡,受图像分辨力的限制,一个像元中可能包括有若干个地物类别,即所谓“混合像元”。因此,对不同集群的区分一般要依据它们的统计特征(统计量)。例如,集群位置用均值向量表示、点群的中心及离散度常用标准

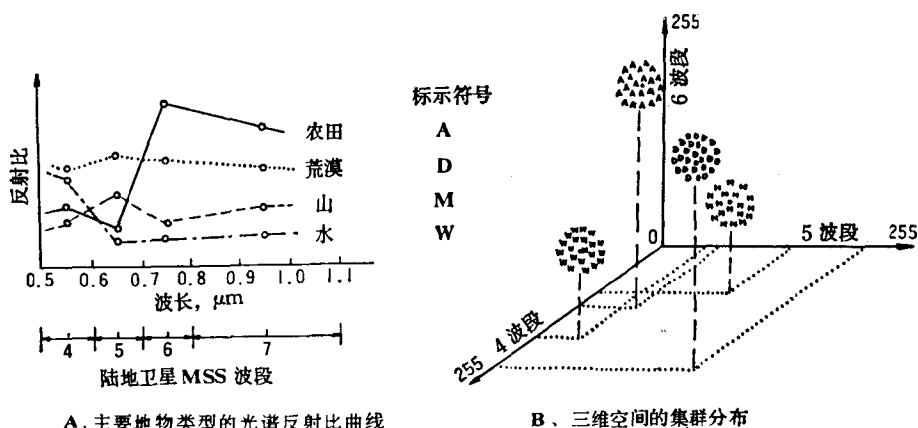


图 4-29 索尔顿湖和因佩里亚谷地陆地卫星MSS数字图像上
主要几种地物的光谱反射比曲线和集群分布
(引自F.F.Sabins, 1977)

差或协方差来量度等等；数字图像常用的几种统计量见表4-4。

表 4-4 数字图像常用的统计量

统计量		计算公式	意 义
单 波 段	均 值	$\bar{X} = \left(\sum_{i=1}^N x_i \right) / N$	反映亮度值总体水平
	方 差	$S = \left[\left(\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{X})^2 \right) / N \right]^{1/2}$	取值的离散程度
	直方图	$a(i) = N_i, i = 0, 1, \dots, 255$	概率密度函数
多 波 段	均值向量	$\bar{X} = [\bar{X}_1, \dots, \bar{X}_n]$	亮度值总体水平
	协方差	$S_{ij} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^n (x_{ik} - \bar{X}_i) (x_{jk} - \bar{X}_j)$	各分取值离散度和各分量相关度
	相关系数	$r_{ij} = S_{ij} / (S_{ii} - S_{ij})$	各分量的相关程度

图像分类处理的实质就是按概率统计规律，选择适当的判别函数、建立合理的判别模型把这些离散的“集群”分离开来，并作出判决和归类。通常的做法是，将多维波谱空间划分为若干区域(子空间)，位于同一区域内的点归于同一类。子空间划分的标准可以概括为两类：①根据点群的统计特征，确定它所应占据的区域范围。例如，以每一类的均值向量为中心，规定在几个标准差的范围内的点归为一类；②确定类别之间的边界，建立边界函数或判别函数。不论采取哪种标准，关键在于确定同一类别在多维波谱空间中的位置（类的均值向量）、范围（协方差矩阵）及类与类边界（判别函数）的确切数值。按确定这些数据是否有已知训练样本（样区）为准，通常把分类技术分为监督和非监督两类。

（二）非监督分类

非监督分类是在没有已知类别的训练数据及分类数的情况下，依据图像数据本身的结构（统计特征）和自然点群分布，按照待分样本在多维波谱空间中亮度值向量的相似程

度，由计算机程序自动总结出分类参数，进而逐一对像元作归类，通常也称聚类（集群）分析。使用的方法有图形识别、系统聚类、分裂法和动态聚类等。

其中，比较实用的是动态聚类。它是首先根据经验和分类数，选定若干个均值向量，作为“种子”，建立一批初始中心，进行初步概略的分类，然后根据规定的参数（阈值）检验分类结果，逐步修改调整分类中心，再重新分类，并根据各类离散性统计量（如均方差等）和不同类别之间可分离性统计量（如类间标准化距离等），进行类的合并或分裂，此后再修改中心，直至分类结果合理为止。动态聚类中，聚类中心和分类数可以按客观的波谱特征自动调整，分类效果一般比较好，但分类结果的确切含义（类别的属性）需另作分析，从实况调查或已有的地面资料中去确定它们的地物类型。

非监督分类由于事先不需训练样本，故处理速度较快，较客观，并能为监督分类的训练样区选择提供参照，一般在有目的的监督分类之前进行。

（三）监督分类

监督分类一般是先在图像中选取已知样本（训练区）的统计数据，从中找出分类的参数、条件，建立判别函数，然后对整个图像或待分类像元作出判别归类。遥感图像处理中常用的监督分类方法有最小距离法、费歇尔线性判别法、贝叶斯线性和非线性判别法（最大似然法）等。

其中，最小距离法在算法上比较简单：首先在图像显示屏上选出训练样区，并且从图像数据中求出训练样区各个波段的均值和标准差；尔后再去计算其它各像元的亮度值向量到训练样区波谱均值向量之间的距离。如果距离小于指定的阈值（一般取标准差的倍数），且与某一类的距离最近，遂将该像元归为某类。该分类法的精度取决于训练样区（地物类别）的多少和样本区的统计精度。由于计算简便，并可按像元顺序逐一扫描归类，一般分类效果也较好，因而是较常用的监督分类方法。

最大似然法也是常用的监督分类方法之一。它是用贝叶斯判别原则进行分析的一种非线性监督分类。简单地说，它可以假定已知的或确定的训练样区典型标准的先验概率，然后把某些特征归纳到某些类型的函数中，根据损失函数的情况，在损失最小时获得最佳判别。该法分类效果较好，但运算量较大。

监督分类的结果明确，分类精度相对较高，但对训练样本的要求较高，因此，使用时须注意应用条件，某一地区建立的判别式对别的地区不一定完全适用。此外，有时训练区并不能完全包括所有的波谱样式，会造成一部分像元找不到归属。故实际工作中，监督分类和非监督分类常常是配合使用，互相补充的。

图像分类处理目前在农林、土地资源遥感调查中应用较广。对于地质体的分类，由于干扰因素较大，不容易取得十分理想的效果，故在地质应用上尚不很普遍。但最近已陆续出现了一批使用分类技术的遥感地质应用成果，较多的是用经变换（比值、K-L等）处理的图像再作分类处理，用于岩性填图或热液蚀变填图等，是值得重视的发展方向。

第五章 地质解译标志与遥感图像 地学分析方法

第一节 地质解译的目标与要求

一、解译的涵义

地质解译(判读、判释)是指从图像获取信息的基本过程。而根据地质工作的要求,运用解译标志和实践经验,应用各种解译技术和方法,识别出地质体,地质现象的物性和运动特点,测算出某种数量指标的过程。

二、地质解译的目的与要求

地质解译的目的是为了获取各种地学遥感信息,以加快地质工作的步伐,提高地质研究的质量,节省时间与经费。

地质解译的要求是:①判明各种地质体和地质现象的形态特征与属性,它们的展布和延伸方向,并尽可能确定其边界;②量测地质体的各种参数,如断层的长度和走向,岩层的厚度,火山锥的地理坐标等;③推测和分析各种地质体、地质现象在时间上、空间上、成因上的相互关系;④编制各种解译图件。

第二节 地质解译标志

地质解译的依据是遥感图像上的影像特征,包括影像的几何形状,大小、花纹、色彩或色调等。它们是遥感的空间和波谱信息的图形显示。其中能识别地质体和地质现象,并能说明其性质和相互关系的影像特征,称为地质解译标志。在遥感图像上能直接见到的形状、大小、色调、阴影、花纹等影像特征,称作直接解译标志。需要通过分析、判别才能识别地质体和地质现象的存在,才能推断其性质的影像特征称为间接标志。如通过水系类型来区分岩性,用构造地貌来推断断裂的存在等。水系及构造地貌就是间接解译标志。

一、图像的色调与色彩

色调、色彩是地物波谱信息构成的影像特征。它是地质解译常用而又重要的解译标志。人眼能把图像色调,从黑—灰—白分为15级。色调的深浅是相对的,它受地质体的颜色、含水多少、风化程度、表面土壤及植被掩盖的程度,光照条件的变化等多种因素的影响。在同一幅遥感图像上,即成像条件基本相同条件,物性相同的地质体理应有相近色调,实际上却不完全相同,或差异很大。所以应用色调标志时应作具体分析。

色调的深浅在不同类型遥感图像上其物理涵义不同。在可见光黑白像片上,色调深浅反映反射能量大小,愈浅反射值愈高。热红外图像色调深浅表示地物温度不同,一般色调

浅的温度高。雷达像片上色调深浅表示微波后向散射能力的大小，浅色调的后向散射能力较强。

黑白像片上色调称为灰阶或段灰度。一般将灰阶分为10级，其标准色调及其与反射率的关系见表5-1。

人眼分辨色彩的能力比分辨黑白灰阶高得多，可以分出百种以上色彩的变化。因此利用色彩标志对地质解译是十分重要的。彩色红外像片上的颜色不是地物的真实颜色，色彩及浓淡的不同，仅表示反射的强弱。表5-2是彩色红外图像上色彩与真实地物颜色的对应关系。

表 5-1

消色地质体的电磁波特征			像片上的影像色调	
吸收率%	反射率%	地质体的原色	灰阶	标准色调
0—10	90—100	白	1	白
10—20	80—90	灰白	2	灰白
20—30	70—80	淡灰	3	淡灰
30—40	60—70	浅灰	4	浅灰
40—50	50—60	灰	5	灰
50—60	40—50	暗灰	6	暗灰
60—70	30—40	深灰	7	深灰
70—80	20—30	淡黑	8	淡黑
80—90	10—20	浅黑	9	浅黑
90—100	0—10	黑	10	黑

(据陈华慧等, 1984)

表 5-2

地物名称	真彩色片上颜色	彩红外片上颜色
清洁的河、湖水	蓝、绿	深蓝—黑
含沙量高的水体	浅绿、黄绿	浅 蓝
高营养化水体	亮 绿	淡紫色、品红
严重污染的水体	黑绿—灰黑	灰黑—黑
健康植被	绿	红、品红
受病害植物	绿、黄绿	暗红、青
秋天植被	红 黄	黄—白
城 镇	灰、深灰	浅灰、蓝灰
阴 影	蓝色、细节可见	黑 色
砂 渍	赤红、棕红	灰 黑

对地质体的色调描述常分为下列几类：①白色调和浅色调：冰、雪、干燥砂子，反射率接近100%，图像上呈浅色调。盐碱土、大理岩在可见光波段也是浅色调。②中等灰色调如石灰岩、白云岩、石膏层，浅色花岗岩等。③深色调是含暗色矿物较多的岩浆岩，铁染的褐色砂岩，风化不深的煤层及煤系地层等。④均匀色调。⑤斑状色调，如出现在地质体中，多与局部成分改变或含水程度变化有关。⑥条带状色调，岩层或带状分布的植被，农作物构成带状色调。

二、地物的几何形态

地物几何形态特征是指地物的形状、大小。如房屋为长方形、河流呈条带状等。地物

的几何形态与图像比例尺、分辨力有关。比例尺越大,分辨力越高,地物细节显示越清楚。反之则很模糊,甚至显示不出来。在相同比例尺图像上,形状和大小不同的地物可以据几何形态标志进行解译。同是条带状的沉积岩层、作物和林带,可据它们的几何形态细节,出现的位置,与地形的关系不同加以区分。但在应用几何形态特征时,一定要注意由于中心投影的影响,对地物几何形态(尤其是遥感图像的边部处)引起的畸变。

三、阴 影

阴影是形态和色调的派生解译标志。阴影也具有不同的形状、大小、方向。色调一般为黑色。在航片上,由于俯视成象而不易观察到地物的侧面形状,可借助阴影来加以判断。还可以借助阴影来测量地物的高度,判定航片的方位。阴影有本影与落影之分。

1. 本影:物体未被阳光直射的阴暗部分称为本影,即本身的阴影。山的阴坡,瓦屋的背阴坡,树冠的背阴那面都是它们的本影。本影有助于获得地物的立体感。山体的阳坡明亮,阴坡较暗,其明暗的分界线改为山脊线和山谷线。

2. 落影:地物投落在地面的影子为落影,即投落阴影。落影可以识别地物侧面的轮廓,如山脊形态、桥梁的孔数和结构类型等。落影还可以判明地物的高度。

3. 根据落影长度计算地物高度

据公式

$$h = T \tan \phi$$

图5-1中 h 是地物高度。 T 为落影长度, ϕ 为太阳高度角。当 $\phi = 45^\circ$ 时,阴影长度正好等于物体的高度。落影的长度、方向随成像日期、时间、纬度的不同,太阳高度角有规律变化。图5-2表示太阳高度角变化,横坐标为月份,纵坐标是纬度,曲线是太阳高度角值。从图中纬度及月份查出成像时的太阳高度角,再按上式求出地物的实际高度。

雷达图像上的阴影是由引地形的阻挡,微波照射不到,而没有后向散射回波的缘故。阴影的长度与地物高度及雷达天线的俯角有关。当俯角不变时,与射程远近有关。近射程处阴影较短,反之阴影长。

热红外图像的阴影是阴影处太阳辐射未直接照到而温度较低,呈现暗色调,称为热阴影。

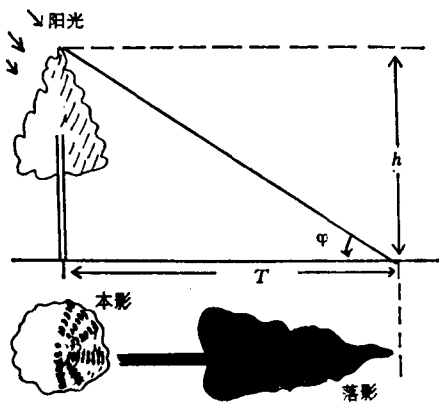


图 5-1 地物、本影和落影之间的关系

四、水系类型和水系分析

水系是非常重要的—种解译标志。对地形、地貌、岩性、构造解译都非常有用。水系是—级水道组合而成的水文网,在遥感图像尤其是近红外波段的图像上可以清晰看到。地质解译时,对末级的支沟、小溪等水文网尤为关注,它们对构造分析与岩性解译有用。

水系分级按水动力学的最小—级为第—级,支流与支流汇合后,级别的增加为前二条支流级别的代数和,如图5-3所示。

(一) 水系类型

水系类型是指水文网的平面组合形态。水系的发育与地形、地质、气候有关。水系对

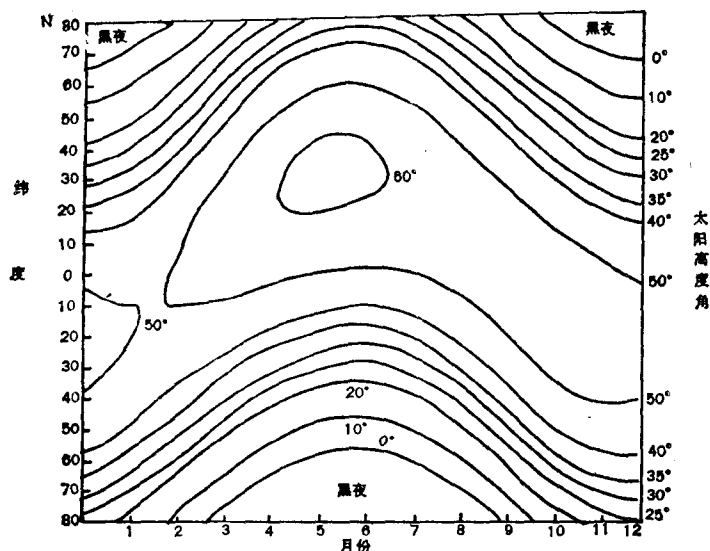


图 5-2 不同纬度不同时期的太阳高度角

新构造活动反映很灵敏。对地质解译很重要。

1. 山区水系类型

山区水系多为侵蚀型，主要有下列六种基本类型：①树枝状水系（图 5-4，A, B, C, D）。是最常见的侵蚀型水系，发育在各种岩性地区。其形态为树枝状，支流的流向自由发展无明显方向性，并以锐角相交，黄土、页岩、泥岩等细粒结构岩性地区多为密集型树枝状水系；不易风化，裂隙发育的侵入岩、变质岩、砂岩区多为粗疏型树枝状水系。树枝状水系有一些变种：(a) 钳状沟头的树枝状水系。为花岗岩类等球形风化明显地常见的的水系。两条支流相交时成“钳状”。(b) 在中等倾

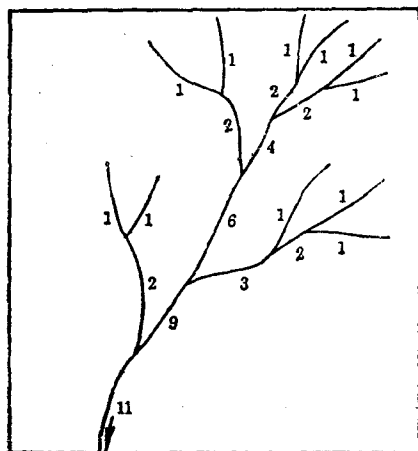


图 5-3 水系分级示意图

斜细粒结构物质组成岩石区，常见似平行状树枝状水系，其支流略有定向的平行排列。②格(z)状水系。受地质构造(岩层产状及裂隙)控制发育的水系。支流之间成直角或锐角相交，而形成格状和棱格状水系(图5-4E, F)。“丰”字形水系是又一种变种的格状水系。它的小支流稀疏、短小，相互平行，主流长直并与支流相互成折角相交。③平行状水系(图5-4G)。多条支流相互平行，并以近似的角度与主流相交汇。这类水系常发育在滨海平原，大的沉积裾、褶皱的翼部，掀斜构造的倾斜面上。④放射状水系与向心状水系(图5-4H)。火山锥、小型侵入体剥蚀残留的孤山、穹窿和短轴背斜发育放射状水系。当放射状的支沟向中心汇集时，称向心状水系。这是构造盆地，洼地水系。⑤环状水系(图5-4, I)。小水系成环状、同心环状。有时构成很好的环状构造。⑥倒钩状水系(图5-4, J)。其特点是支流与主流以钝角相交，即主与支流相交的锐角指向与流向相反。这种异常的水系是断裂控制的典型标志。如云南小江的一些支流(如尖山沟、泥

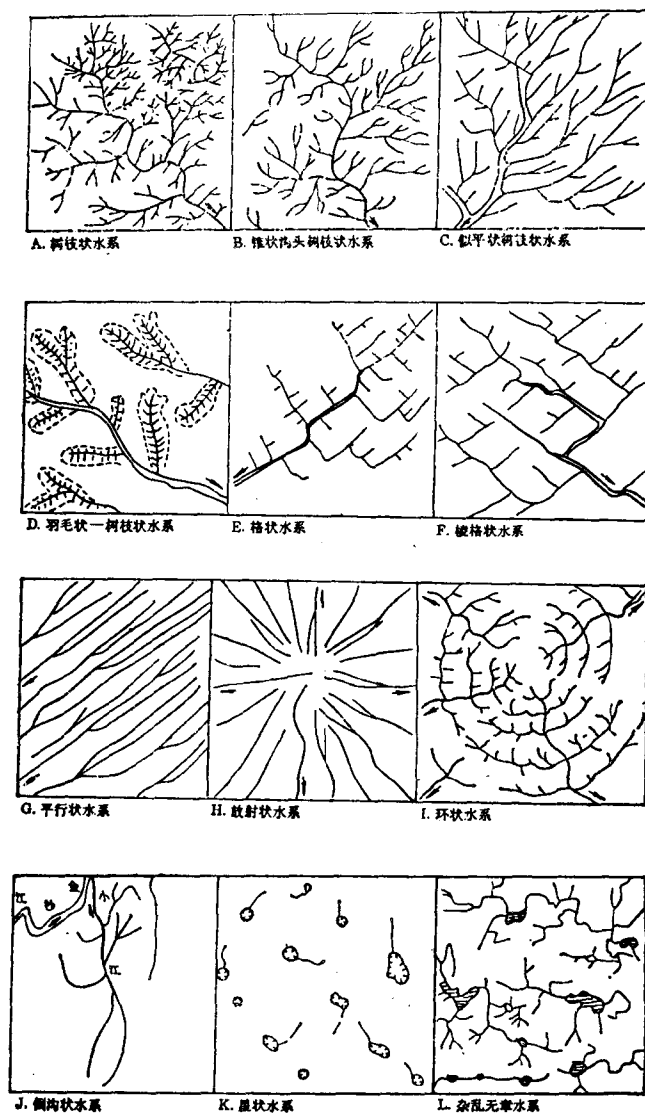


图 5-4 山区水系类型

紫沟、板河)都是以钝角与小江相汇合。此外还有与岩溶作用有关的星状水系(图5-4K),水渍物沉积地区的杂乱无章的水系(图5-4L)等。

2.平原地区的水系类型:①扇状水系。常发育在河流入海和湖口处,洪积扇上扇状水系最为典型(图5-5,A)。②网状水系。大河口或河岸平原上常见的水道纵横,交织成网的水系(图5-5,B)。③辫状水系。多沙河流的出山口处或宽阔间歇河河滩上,河槽来回摆动,形如辫状(图5-5,C)。④曲流型水系。平原区河弯曲,曲流,古河道,牛轭湖发育(图5-5,D)。松花江中游、长江湖北荆江段这种水系发育(图5-5,E)。曲流在地壳抬升的山区,就发展成为深切曲流。北京门头沟一带永定河深切曲流,四川一些河流段的深切曲流,都十分典型。

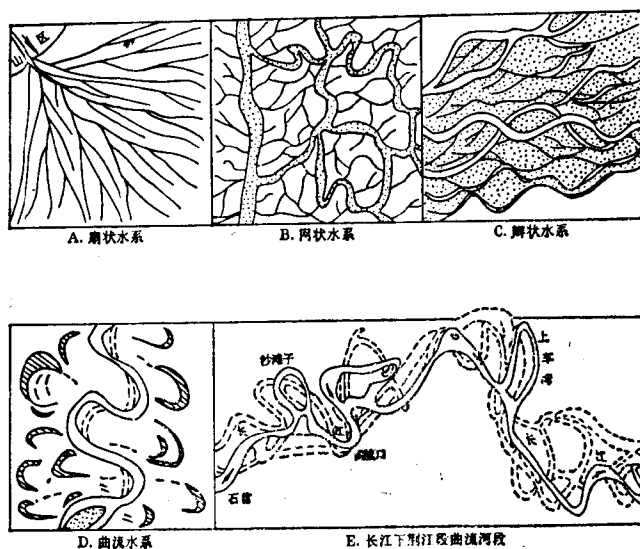


图 5-5 平原区水系类型

(二) 水系分析

1. 水系密度分析：①密度大，反映地表迳流发育，支沟密集，土壤与岩石透水性不良，泥岩、页岩、粘土、粉砂岩区常见。②密度小，表示地表迳流小，岩石裂隙发育，水系长而稀疏。砂岩、石英砂岩发育区常见。③密度中等。是比较多见的水系密度。

2. 水系的均匀性，对称性，方向性分析：水系均匀的地区，表示该区岩性抗风化剥蚀能力和裂隙发育都比较相近，这是大片花岗岩或同一种沉积岩出露区较常见。水系的对称性反映区域地形或大片成层岩层向一侧倾斜。如四川盆地长江以北支流发育，南岸则支流较少，反映盆地北高南低。水系的方向性，主要反映区域山系走向、岩层走向及构造走向。滇西川西横断山脉的约束，金沙江、澜沧江等平行排列，自北向南流。

3. 冲沟形态分析。冲沟形态与组成冲沟的物质岩性有关。粘土、粉砂质粘土区的冲沟，沟横断面为浅碟形，纵断面为均匀缓坡。中等粘性、直立裂隙发育的黄土，冲沟断面为“U”形，沟头陡立，沟底呈阶梯状的复合坡面。在砂岩、砂砾岩、火成岩发育区，冲沟断面为“V”形，纵断面为较均匀陡坡。上述冲沟如果局部有较坚硬岩层出露，则局部发育为瀑布、陡坎。

五、影纹图案

遥感图像上的地物，其细节不外由点、斑、线、纹、垅、链、格、栅等影纹所组成。并有规律地重复出现而构成各种图案（图5-6）。影纹图案是地物的形状、大小、色调、阴影、小水系、植被、微地貌、环境因素的综合显示。影纹图案可以宏观地反映大面积出露的某一种地物（如某一种岩类）。如贵州省峨眉山玄武岩常成为“蠕虫状”影纹特征。它可以作为二叠纪峨眉山玄武岩的一种岩性解译标志。有时两个大的地质构造单元，由于岩性、构造的不同，地质历史的不同（如一侧强烈抬升，一侧拗陷），使得大区域地形地貌特征也不同，在小比例尺遥感图像上，就会显示为两个影纹图案的差异，所以它也是地质解译标志之一，但常被忽略。常见的影纹图案有：①条带状（图版31），如由岩层

层理构成的条带状影纹。②网格状(图版32,33)。这是与区域性两组或多组层理、裂隙、冲沟等地物组成的影纹。③环带状,是由圆、椭圆形地物组成的影纹。④垅状。硬的岩层、垅岗、沙垅、冰碛堤组成。⑤链状。新月沙丘链是典型链状(图版34)。⑥斑点状和斑块状(图版35、36)。大比例尺航片上的树林常成斑点状,而细碎的田块则成斑块状。TM、MSS图像上华北平原的村落也是斑块状的。

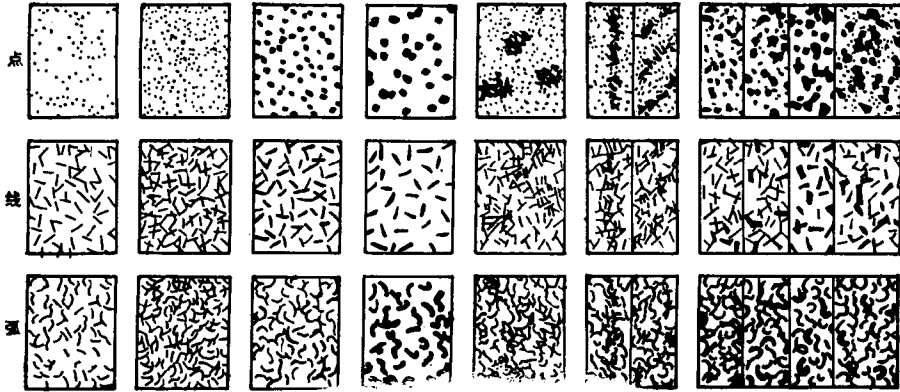


图 5-6 遥感图像的花纹图案

六、其他地质解译标志

(一) 土壤、植被标志

土壤与当地的松散沉积物有关,松散沉积物与母岩有关,植被发育在他们上面,他们有很密切的相关性。地质解译可以通过对土壤、植被的相关分析,推断其下伏基岩的性质。基性和超基性侵入岩风化土壤较贫瘠,并含有不利植物生长的成分,植被发育较差。中酸性岩浆岩风化后形成亚粘土和粘土,土壤肥沃,裂隙水较多,植被和经济林多。碳酸盐岩风化地区,土质贫瘠而薄,加上缺水而植被发育不良。因而植被的类型不同,植被的局部异常(繁茂或空白)都可为地质解译提供信息。当然这要具体情况而定,并且应当引入有关地植物学的知识。原苏联曾利用在金伯利岩筒上植物因含氮、磷、钾较多而比较繁茂的标志来寻找金刚石矿床。植物的选择性生长,也是地质找矿的一种标志和依据(参阅第九章)。

(二) 人类活动标志

古代与现代的采场、采坑、矿冶遗址、碴堆是找矿标志。耕地的排布反映地形地貌特征,如火山口周围耕地呈环状布列。村落与耕地密集程度反映当地土壤的宜耕性,地下潜水的供水情况等。

第三节 遥感地学分析方法简介

遥感器能获取到的只是成像瞬间,成像地区地表的自然与社会环境的二维(平面)的综合信息。这些信息中,只有一部分对地质解译有用。对地质解译有用、无用的信息相互联系又相互干扰。如上文所述地表坡残积物和植被与当地母岩有联系,可以据此来分析母

岩性质；同时坡残积物和植被又掩盖基岩，干扰了对岩性信息的识别。因而所有解译（不仅仅指地质解译）都存在不确定性与多解性。为提高地质解译的质量，解译人员的地学知识与工作经验，正确遵从一些解译原则，合理地运用遥感地学分析的方法就是非常重要的了。

地质解译的原则：①从已知到未知，②先易后难，先从标志最清楚地段到较模糊地段，③先整体后局部，④先目视预解译到其它方法，⑤先从构造解译入手，⑥图像解译与野外调查相结合。

《遥感地学分析》（陈述彭，1990）一书，概括了遥感地学分析的主要方法。

（一）遥感资料的相关分析法

在一定区域内各种景观要素间是相互依存，相互制约的。往往是一事物的存在反映其它事物的存在；一种现象可指示另一种现象的存在。地质解译时，可以根据地质规律的认识，用相关分析法进行解译。如第九章引用美国内华达州金场地区寻找多金属矿的例子。就是通过地质研究，确定该区矿化主要与内生作用的热液蚀变有关，而热液蚀变岩石又与未蚀变的岩石地物反射波谱不同，利用比值法等图像增强处理，来识别区域蚀变，从而用它来作为找多金属矿的重要标志。

（二）交叉分析法

遥感地学研究为了取长补短，常常需要多种技术方法交叉使用。如光学图像处理，目视解译，计算机数字图像增强等交叉进行。在建立区域典型的岩性-地层解译标志时，也需要预解译，野外验证，再解译，反复补充修改，使建立的解译标志更有代表性，用它来指导解译。在利用数字图像增强处理时，也是经过预处理，野外地物波谱测试分析，验证，再修改增强处理方案，从中选定最有效的处理方法。

（三）环境本底法

所谓本底，就是某种地学信息的区域正常特征或正常背景值。如区域地球化学中某种元素的背景值。如某种岩性（如花岗岩）的平均反射波谱值等等。这些通过归纳总结，实测，统计分析得来的正常特征和正常背景值就是正常值。只有在这个基础上，才能区分出异常来。有了地貌异常，色彩异常，波谱异常和某些成矿元素的异常，才能指导各种地质分析和研究。所以环境本底的建立非常重要，也要非常慎重。

（四）信息复合法

信息复合是指同一区域内遥感信息之间，或遥感与非遥感（如地质）信息之间的复合。复合时通过资料的空间配准与内容复合，产生一组新的空间信息或一组新的合成图像。目的是为了突出有用的地质信息，减免和抑制无用信息，改善图像质量，提高解译和研究的能力。详见第十一章。

（五）历史对比法

历史对比是利用遥感图像资料的时间信息，把不同时间的同一地区或同名地物，进行多时间的对比，作动态分析。如对黄河、长江口三角洲的发育特点的分析，对陕北黄土高原水土侵蚀的分析，对某城市的发展动态分析，对洪水灾害（如1992年对太湖地区洪水的SAR图像对比分析）等。从历史对比中归纳总结出其发展动态与规律，指导划规与治理工作。

（六）系列制图法

用它来表示研究地区的地学分析各种成果。这也是地质工作中非常常用的方法。如区域地质调查,区域成矿研究,地史古地理分析都常用的方法。系列制图有三个基本条件:①必须以同一遥感信息源为制图的基础,②有统一的制图规范与分类原则,③按一定逻辑顺序依次派生出各种专题图件来。如构造解译时,用增强处理的遥感图像,编制出同一地区的线性构造、环状构造等解译图件来。然后再派生出不同走向方法的线性构造图及线性构造等密度图,线性构造交(叉)点等密度图来。第十二章介绍的山西太原幅农业自然条件与自然资源系列图就是一个例子。

(七) 地理信息系统

它是管理空间数据的计算机系统,是最近十年来遥感工作发展很快的一种技术方法。地理信息系统为地学遥感提供辅助信息,有助地质遥感数据分类和应用,提高地质分析的质量与速度。在第十三章作专门介绍。

(八) 其它地质学分析方法

地质解译时还会用到地质学的一些基本分析方法。如根据交切关系来判定断裂、岩脉、矿脉的新老关系,用构造地质学知识来判明遥感图像上断裂的两盘相对运动等。在此不一一介绍。

第六章 遥感图像地貌解译及其应用

第一节 概 述

遥感图像具体而细微地显示成像地段的地表形态特征,通过解译可以识别地貌的形态特征、成因类型、单元的划分。通过综合分析还能从时空两方面识别地貌的发展趋势和规律。从时间上识别哪些是正在发展,哪些是已经停止发展并正遭受破坏的地貌类型,还能从多时相遥感资料上,对其发展进行动态分析(见第十章)。从空间上,利用遥感资料很容易判别不同级别的地貌单元,类型的叠合,如高原上发育断陷盆地,盆地内又发育更低一级的岩溶盆地等等。同时,一个地区的地形地貌与当地的岩性、构造有着密切关系,因此,它又是地质解译的重要标志。

为了达到综合解译分析的目的,解译时要掌握要领。首先要从区域地貌入手,了解区域地貌形成条件与成因,以及区域主要地貌形态特征。通过地貌形态的分析,全面系统地了解地形演化动态。第二,注意各种解译对象的相互关系,包括剥蚀地貌和堆积地貌的相互关系,地貌单体和组合形态的相互关系,宏观与微观地貌的相互关系,图像影纹特征与地貌类型的关系,地貌形态与地质体之间的相互关系,不同比例尺及不同类型图像上同一地貌形态解译标志的差异性等。第三,从正常地貌中识别异常地貌(反常地貌)。它是指与正常地貌过程形成不相符合的地形形态,常与岩性构造密切相关。例如水系的支流与主流成钝角相交(正常的应当是锐角相交)的倒钩状水系。又如美国密西西比河中游的牛轭湖所形成的堤呈长条状,堤坡呈缓坡。但局部牛轭湖出现环形堤,堤坡为陡坡。经研究环形堤是隐伏盐丘构造造成的异常牛轭湖形态。第四,要对各种标志进行综合分析。如对非洲和阿拉伯半岛间曼德海峡的遥感地貌与地质综合分析,确认红海及亚丁湾是裂谷型海湾,表明现代阿拉伯半岛与非洲分别向北西及南东漂移。第五,有条件的情况下,最好对航片与卫星像片进行对比解译分析,编制各种地貌图件。

第二节 流水地貌解译

流水地貌是地表分布最广的地貌形态,它也是最重要的一种地质解译标志。

一、侵蚀沟及洪积扇的图像特征

(一) 侵蚀沟

侵蚀沟是航空像片和卫星图像上常见的影像。它以线状影像显示,不同方向的侵蚀沟组合在一起,形成不同类型的水系网。侵蚀沟的形态特征和发育强度与岩性和构造及大气降水等特点有关。在岩性坚硬,胶结物致密,新构造运动上升区,侵蚀沟呈“V”形,发育程度好。侵蚀沟的沿伸长度取决于季节流量,水量大,沟形切割深,沟壁陡而窄,当

水量小时，沟形切割浅、沟短而壁窄。在岩性较软的地区，岩性以钙质或泥质胶结，风化强烈，透水性较好的地段，侵蚀沟呈“U”形或开阔型。在砾岩地区侵蚀沟呈树干状，在砂岩地区侵蚀沟呈树枝状，在页岩或黄土地区侵蚀沟呈密集树枝状。侵蚀沟的形态特征往往受岩性和构造节理，断裂控制，常见的形状有菱形、卵形、直线形、宽带形和梯形等。在遥感图像上可以利用侵蚀沟的形态特征和侵蚀沟的稀密程度以及它们的方向性解译不同类型的岩石和构造。（图版37）

（二）洪积扇

它是遥感图像上常见的地貌形态，特别在干旱的气候地带和山麓交互地带，尤为常见。洪积扇在遥感图像上，侵蚀沟沟口呈锥形或扇形，其规模大小取决于洪水的大小和物质来源，当洪水大，物质来源丰富时，洪积扇大，反之则小。在航空像片上观察洪积扇可以清楚地反映由洪积扇的顶部到扇缘，由不均匀斑状影纹逐渐变成均匀深色的影纹，在扇缘边侧局部有沼泽或泉的出现，表明洪积扇的物质由粗颗粒物质逐渐过渡为细粒。洪积扇的叠置关系往往反映新构造运动和活动断裂（图版4，37，图6-1）。如果山体发生间歇性上升，洪积扇呈串珠状，山体发生不均匀的倾斜时，洪积扇沿构造掀起方向发生迁移。当洪积扇下部隐伏着岩体，穹窿或背、向斜时，则洪积扇呈圆形、椭圆形等。在山麓交互地带洪积扇呈线状排列。洪积扇的分流点呈线形时，表明洪积扇受隐伏断裂构造所控制。因此在遥感图像上利用洪积扇形态和叠置关系可以分析隐伏构造和活动构造。

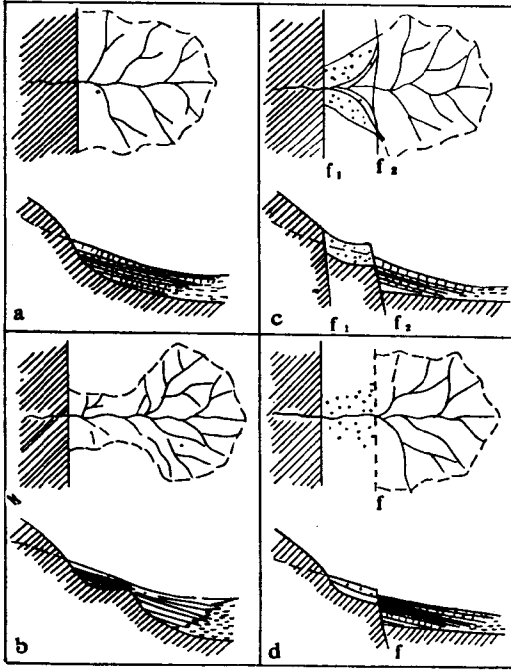


图 6-1 洪积扇与构造运动的关系

（根据杨景春，1985）

a. 山前下沉，洪积扇向平原方向发展；b. 洪积扇基底发生隆起，隆起处洪积扇变薄，洪积扇向凹陷部分伸展；c. 洪积扇上发生断层抬升，新洪积扇嵌入老洪积扇内，老洪积扇形成洪积阶地；d. 洪积扇上发生断层活动，新洪积扇向平原迁移

二、河流地貌的图像特征

在遥感图像上河流呈不同形状的带状或线状影像。在大比例尺航片上河流呈带状，影像清晰，可以直接判别河流的侵蚀和堆积地形。在小比例尺卫星图像上河流呈线状，可以判别河流流域的概貌和河流的变迁。在多波段遥感图像上根据色调的深浅能判别河水的混浊度、悬移泥砂和水污染等。利用多时相遥感图像可以研究河流演变的动态变化和古河道的分布等等。如美国宇航飞船拍摄的图像，在撒哈拉沙漠中发现地下古河道，证明该古河道是古尼罗河，这项发现对改造沙漠成绿洲提供了水资源。我国在吉林西部大安一带，应用陆地卫星图像发现嫩江的古河道。在图像上古河道断续的弯曲的凹地呈现，凹地中发育沼泽、牛轭湖、盐碱化地。含水湿地呈深色，盐碱化地呈斑状浅色，在图像上形成花斑状的带状凹地。在凹地两侧有垅岗，是古阶地。这一发现对吉

林省改造干旱草原区和城市开发提供了有利条件。

(一) 河谷

河谷由谷坡和谷底组成。在航空像片上山区河谷的河床平直,河谷深切,冲积物不发育。在立体镜下观察时其形态多呈“V”形谷,在平原区或山间盆地河谷的河床弯曲,呈曲流型或蜿蜒型。当河床弯曲愈大时,形成狭窄的曲流颈,经流水切割取直,形成牛轭湖。在遥感图像上常用牛轭湖等标志恢复古河道的位置。在小比例尺图像上,构造上升区河谷呈线状弯曲,似古蛇盘谷。在下降区河谷的弯曲呈辫状或游荡型,如黄河下游孟律一带的河谷(图版38)。

(二) 河漫滩

它是谷底的一部分。在山区河漫滩不发育,较窄呈带状。在平原区河漫滩呈带状,色浅,形态上呈心滩、方形、弧形、鬃岗状、堰堤式等,并常见心滩。植被发育,有沼泽,积水洼地成牛轭湖的残迹。在热红外图像上河漫滩呈深色(图版38)。

(三) 阶地

河流阶地只有在大比例尺遥感图像上比较清晰。在图像上呈阶梯状条带,断续分布,连续性好,阶地面上耕田,城镇,交通干线密集,植被发育。较老阶地表面常遭受破坏,年轻阶地保留完整。一般情况下侵蚀阶地色调深些,堆积阶地色调深浅不一,植被发育,居民点多。基座阶地与堆积阶地相似,不易判别,有时能见到陡坎呈深色窄条,不稳定。阶地是新构造运动的标志,解译时应注意阶地的级数、宽度、高度和同一阶地的延伸长度(图版38)。

三、河流三角洲的图像特征

河流三角洲一般呈扇形或三角形、鸟爪形和尖头形等,我国黄河三角洲呈扇形。在多时相和彩色合成图像上能够清晰观察其形态特征和演变的痕迹。三角洲由陆地向海可分为三部分:海上三角洲、海下三角洲和三角洲前缘。它们的色调深浅不一,近河床地段色调较浅,叉河较发育,组成稀疏网状水系。在多波段图像上如MSS4,5通过色调和植被生长的差异研究三角洲上河道变迁和三角洲增长情况,对研究三角洲的消长和发展趋势有较好的效果。例如中国石油勘探开发科学研究院●利用1976—1990年间15个年份的不同时相的陆地卫星图像,经过处理,深动地反映了黄河尾间及其三角洲的演化(图版11,12)。通过深入对比分析浅海历年的冲淤变化,展示出黄河口的鹦鹉嘴正向莱州湾一侧延伸,以惊人的速度造陆,如黄河尾间的北汉流路15年间造陆432km²,平均每年造陆约23km²。它对油田开发、海洋环境保护和黄河三角洲的国土规划和治理,提供了可靠的依据。

第三节 岩溶地貌解译

岩溶又称喀斯特,它具有独特的地貌形态,成为优美的风景胜地,如云南石林。在遥感图像上岩溶的溶沟常以线状和网状呈现,它受节理和断裂控制,在厚层灰岩地区节理发育差,网状稀疏,在薄层灰岩地区节理发育网状密集。在两组节理或断裂的交汇处常发育漏斗或落水洞,其形态不一,形态有圆形、椭圆形或不规则碟形。在岩层坡度较缓,裂隙发育的部位,漏斗较密集(图版39,63)。在构造背、向斜轴部或破碎带上漏斗呈线形条

●黄河三角洲沿海遥感动态分析图集,范兆木等,1992

带状分布,因此它的分布规律成为解译岩溶地区地质构造的重要标志。

岩溶洼地是漏斗不断扩大或合并而成的。它的直径可达数公里。洼地再扩展形成坡立谷,面积可达几十或几百平方公里,其形状不规则。它们常被河流贯穿形成喀斯特湖,湖中常残留一些孤山或残山。

峰林、丛林常呈现群连山峰。在遥感图像上以深色调,似圆形的山峰呈带状分布。在舒缓的褶皱构造区,峰林、丛林呈星点状;在紧密褶皱构造区呈脊状展布。峰林之间常发育着漏斗和洼地。孤峰是岩溶发育的晚期产物,其形态似圆锥形,地形上呈单面山。它是判别岩层产状的标志。(图版71)。

岩溶地貌除上述类型外,还有溶洞、暗河等,一般在航片上难以观察,可根据热红外图像或其它间接标志提测其分布。

第四节 沙丘地貌与黄土地貌解译

一、沙丘地貌的图像特征

沙丘是干旱和半干旱地区主要地貌类型。由于气候条件恶劣,交通不便,地貌调查十分困难。沙漠化对城市威胁很大,它可吞没良田变为沙洲。常见的沙丘有新月形沙丘、沙链和沙梁以及金字塔形等沙丘。

新月型沙丘是最常见的沙丘,其形态似新月形。新月型沙丘的两翼指示出顺风方向,迎风坡坡形微凸而平缓,坡度在10度—20度之间。背风坡坡凹而陡,坡度在28度—36度之间。沙丘一般高几米到十几米,宽约几百米。在新月型沙丘密集区,沙丘相互连接形成丘链(图版34,40)。当沙丘被植被固定或半固定时,形成隆状弧形的沙梁。在风的作用下沙丘和沙链层层叠盖,形成复合形沙丘。在风的吹物作用强又有植被生长条件下,可以形成弧形沙丘,如我国毛乌素沙漠地区。在沙丘走向与主导风向近于平行时形成沙垄,呈长条钩状、直线状或条带状的垄状地形,我国青海柴达木盆地沙漠沙垄较发育。金字塔形沙丘是对风型多向风的作用而形成的,沙丘没有明显的定向性,其形状似金字塔或锥形,在强对流风向作用下可形成蜂窝状沙丘,上述地貌特征在遥感图像上都十分清晰。

沙丘在风的作用下移动速度惊人,一般难以测定。但是利用不同时相的图像对比,可测算沙丘移动速度,对城市环境保护提供可靠的数据。例如青海龙羊峡水电站附近沙丘发育,每年有五千万立方米的沙入库,对水库危险极大。青海省遥感中心利用多时相图像测定流沙移动的速度,计算出水电站附近的共和盆地中的沙丘,从1967年至1985年之间小型沙丘每年移动约19.53米,中型沙丘每年移动6.43米,为保护水电站解决了当务之急。他们用多时相图像通过下列公式求得沙丘的平均移动速度:

$$\bar{V} = |X_2 \cdot m_2 - X_1 \cdot m_1| / |Y_2 - Y_1|$$

其中 \bar{V} 为沙丘的平均移动速度; m_1 、 m_2 两个时相的图像比例尺; X_1 、 X_2 为同一沙体在不同时相航片上到某一定参照物的距离; Y_1 、 Y_2 为两个时相拍摄的具体时间(年)。

二、黄土地貌的图像特征

我国是世界上黄土地貌最著名的国家之一。主要分布在黄河中游地带。黄土地貌主要

受基底构造、古地形和流水作用强度所控制。在植被稀少情况下,黄土流失严重。据统计我国黄土流失每年 $4600\text{t}/\text{km}^2$,最大可达 $30000\text{t}/\text{km}^2$,是世界上流失最严重的国家。

黄土地貌是根据沟谷的切割和残余程度以及形态特征划分的。在遥感图像上黄土塬地势平坦、开阔,冲沟稀疏,耕田发育。黄土梁地形上呈条带状。黄土峁是由黄土梁再被流水切割,形成不连续的小丘或孤丘。冲沟呈放射状,冲沟切割深呈“V”形。黄土涧是黄土掩盖古河床后形成宽而浅的带状凹地,它延伸长,植被茂盛。黄土阶地是阶梯状的黄土地形,阶地上耕田发育,冲沟发育。黄土地区的冲沟纵横交错,在平面上组成树枝状、梳状、格状、羽毛状和环状等水系。黄土地区在遥感图像上出现异常水系或影纹时,应该注意有可能在黄土下存在隐伏构造或隐伏地质体。

第五节 海岸地貌解译

海洋与陆地的交互地带称为海岸带。它由海岸、潮间带和水下岸坡组成。海岸地貌有基岩海岸、沙质海岸、泥质海岸、红树林海岸和珊瑚礁海岸。基岩海岸在遥感图像上地形起伏小,山坡冲沟发育,水系呈树枝状或网状,海岸台地平坦,台面微微倾向海面,色调较深而均一,有时有斑点状纹影。当岩性软硬相间时,形成锯齿状基岩海岸。基岩海岸的海蚀崖呈线状分布时,是断层海岸的标志。沙质海岸和泥质海岸的地形起伏较小。色调较均一,沙质海岸色调浅,泥质海岸色调深,冲沟发育,植被茂盛。海岸地貌除上述外,还有沙嘴、沙堤和海成阶地等地形。在遥感图像上沙嘴呈狭长的浅色条带,头部弯曲呈钩状。沙堤是平行海岸带状地形,色调较浅。在数条沙堤之间发育着沼泽和泻湖,呈深色不均匀的斑块。在遥感图像上可以利用新老沙堤的分布范围、条数等特征研究海岸演化。海成阶地在大比例尺图像上平行海岸成阶梯状条带展布,连续性较好。海积阶地和基座阶地色调深、均匀,有植被生长。海蚀阶地色调深浅取于基岩。

研究海岸地貌时充分利用多波段图像和假彩色合成图像。在蓝—绿光波段范围内,有利于观察海滨和水下的地形,一般观察水下20m左右。在黄—红光波段范围内,有利于观察海岸的泥沙流,如琼州海峡的MSS5图像上能清楚看到海水下的地貌形态和泥沙流。在红外波段范围内,有利于研究海水的分布范围和海岸线的轮廓。假彩色合成图像能提供更丰富的信息,如渤海湾假彩色合成图像上可清楚分辨出黄河口的泥沙由南向北沿海岸向塘沽方向移动与海河口泥沙汇合,给治理海港提供依据。

第六节 重力地貌解译

重力地貌是自然界分布较广的地貌形态。由崩塌、错落、滑坡、土层流动等作用形成。它们都能引起一些自然灾害,对国民经济建设危害大。

一、崩 塌

它常发生在岩性坚硬,节理发育地区,陡坡周围堆积成岩堆或倒石堆。在遥感图像上崩塌的陡崖新的色调浅,老的陡崖色调深。在陡崖的下方有浅色调的锥状地形,有粗糙感或呈花斑状的锥形。新生的崩塌体植被少,古老的崩塌体植被生长较为茂盛(图版37)。

崩塌的规模不一,大型崩塌体常发生在活动构造或地震区、高山区,它的上方常有弧形裂缝或断裂构造,大型崩塌区大量的崩塌物可以堵塞河谷,迫使河流改道。

二、滑 坡

滑坡是常见的重力地貌,它有明显的地貌特征。在遥感图像上其形状有簸箕形、舌形、弧形和不规则形等。它的规模大小与地质构造有关,在岩性脆弱,岩层倾向与坡向一致或大型节理发育地区 and 活动断裂带附近,常发生规模较大的滑坡。在航空像片上能见到明显的滑坡壁、滑坡台阶、封闭洼地、滑坡舌和滑坡裂隙等(图版41, 42)。在滑坡体的斜坡上常见到泉和湿地,树林杂乱似马刀树或醉汉林。老滑坡冲沟发育,远离河流在滑坡体的边缘有耕田或居民点。

滑坡地貌解译时应注意滑区的断裂构造、地貌特征、岩性和水文条件,特别在规模大的活动断裂地段,地形坡度大于 35° 的山坡最容易发生。例如我国1983年3月7日在甘肃酒勒山地区发生特大滑坡,滑坡体在十几秒钟内使三个村庄全部生命财产荡然无存,造成历史上罕见的大滑坡。滑坡发生后第二天拍摄的航空像片非常清晰见到滑坡体呈“掌形”,滑坡体的因素,如后壁、裂隙、鼓丘等都能见到。从滑坡的规模大、后壁高、坡面角缓以及整体性较好,滑动距离长等特点,确定该滑坡属推动式深层滑坡。根据卫星图像线性构造解译,滑坡体严格受断裂构造控制,它发生在近东西向,南北向,北东向和北西向四组断裂的交汇处,差异性升降活动强烈,使岩石破碎。在山前断裂处地下水活动频繁。这样促使酒勒山滑坡体不稳定,于是发生了滑坡灾害。通过航卫片调查,准确、快速地将滑坡体动态变化信息显示出来,为灾害地质现象调查和研究开拓了广阔的前景。

除此之外,还可以用不同时相的图像进行对比分析,预测滑坡的发展趋势。如铁道部用两个时相航片(1976年和1985年)对陇海铁路宝鸡至天水间王家庄车站北侧毛家庄滑坡进行详细解译(图版41, 42),发现原滑坡壁附近出现小崩塌和滑坡壁、滑坡裂隙和台阶等现象,并有新的发展,有二处出现新的滑坡。在站的西侧泥石流堆积区范围明显增大,说明必须采取预防措施,不然对火车站有威胁,铁道部及时采取了措施,防止了灾害的发生和对车站的破坏。

在遥感技术上还能用计算机处理对地滑体的面积作估算,一般采用梯形法对不规则图形面积计算,其公式如下:

$$S = \sum_{i=1}^n \left[(Y_{i+1} - Y_i) \cdot \frac{X_{i+1} + X_i}{2} \right] (i=1, 2, 3, \dots)$$

式中, X_{i+1} , Y_{i+1} , X_i , Y_i 分别为相邻两个数字化点的X、Y坐标值, n 为多边形数字化点数。它能够精确地计算出滑坡体的面积范围,再根据滑床深度的(厚度)计算公式:

$$h = \frac{S_1}{\sum \Delta X}$$

式中, S_1 为原点位置以下滑下沉面积, $\sum \Delta X$ 为观察点水平位移量,推测滑坡体的总土石方量。

三、泥 石 流

泥石流是一种严重的自然灾害。它在具备泥石流形成条件下,可以缓慢向下流动,也

可以在数秒钟内倾泻向下，其能量大，破坏强，对人类危害极大。在航空照片上泥石流的顶部呈瓢形，山坡陡峻，岩石破碎强烈，色调深浅不一，冲沟内有大量松散固体呈浅色，冲沟没有沟槽，无植被生长。流动的泥石流呈条带状扇形，轮廓不固定。泥石流发育地区常是崩塌、滑坡发育地段，影像交织错乱，色调变化大。

航空像片上对泥石流的调查，直观、清晰，而且还能用多时相航空像片进行对比分析，研究不同时期泥石流的发生和发展趋势，可以将航空像片与卫星图像结合，综合分析区域泥石流体发生的地质背景和可能发生的地段，并用计算机图像处理测算其面积和土石方量，供有关部门采取有效措施，减少损失。

第七节 冰川地貌解译

我国冰川以冰斗冰川和山谷冰川为主，主要分布在高山区。它的地貌形态主要有冰斗、刃脊和角峰以及冰碛垅、冰碛丘陵、鼓丘和冰水扇等。在遥感图像上冰斗外形近似卵形或三角形，周围高，中间低，形成一个围椅状洼地。两个冰斗之间的山脊是刃脊，呈锯齿状。角峰是由二个以上冰斗交汇的山峰，形状似金字塔形，放射状山脊，山顶崎岖不平，如我国的珠穆朗玛峰。冰川谷谷底较开宽，谷坡陡峭呈“U”形谷。在冰川谷中有垅状地形，如侧碛垅、中碛垅和尾碛垅，由于侧碛垅和中碛垅不易保存，在冰川谷中以平行冰谷断续分布的垅状地形显示。尾碛垅呈弧状或垅状地形垂直于冰川谷。尾碛垅色调深，在垅内侧有沼泽，垅外侧有扇形地形，称冰水扇。尾碛垅经受后期流水切割成丘陵状地形，最终的尾碛垅是确定第四纪冰期的重要依据。山谷冰川形成的冰碛丘陵规模小，一般情况下难以判别。

冰缘地貌，又称冻土地貌，主要地貌形态有石海、石河，多边形构造土等。在遥感图像上石海呈斑状影纹呈现。石河以长条状斑状影纹显示，它的两侧有河流侵蚀，色调紊乱，有粗糙感。我国长白山天池下发育着石河。多边形构造土是由土层冰结缩裂产生的，在大比例尺遥感图像上呈多边形或蜂巢状影像。当冻土由石质组成时形成石环，在远红外图像上冰土呈深色调、非冻土呈浅色调，而多边形土呈浅色，其周围的裂缝呈深色。

第八节 构造地貌解译

地表的大型山系、高原、盆地的形成与发育大多受区域构造的控制和影响，同时也程度不等地反映区域构造基本轮廓与特征，并在遥感图像上显示出来。局部的断裂、褶皱和岩层产出状况，同样也会以各种中小尺度构造地貌形式显示在遥感图像上。识别不同尺度的构造地貌对地质解译分析和编图是非常重要的。“遥感图像地质解译教程”（1981）对内地貌、构造地貌遥感解译有较为详细的介绍。下面简述对遥感解译比较重要的构造地貌内容。

一、山体构造地貌解译

小尺度的单个山体构造地貌最常见的是方山、单面山、猪背岭。遥感图像上当抗风化剥蚀能力不同的软硬岩层互层水平产出时，坚硬岩层常残留山顶，形成方山构造地貌（图

6-2), 其特征是近水平产状, 阶梯状坡面, 山周边陡立。如果坚硬岩层缓倾斜产出时, 风化剥蚀后形成单面山、猪背岭、鬣岗, 其解译标志见第七章第一节。单个小侵入体(如岩枝)和火山机构、新构造穹状隆起、盐丘构造, 在遥感图像上形成孤峰、圆丘、小盆地、火口湖等构造地貌。

规模较大的群山或山脉显示的构造地貌有: ①褶皱山(如秦岭山脉), 其遥感特征是山体走向、主要水系与区域构造(断裂、褶皱)的走向相同。②穹状山(如四川省自贡市西北), 它是大型穹状构造隆起形成的山脉, 放射状水系及穹窿构造的存在是其特征。③断块山(如横断山脉)是断裂切割抬升造成的山脉, 平行羽状水系, 深谷陡坡, 断层崖发育是其遥感特征。

二、坡面构造的解译

山体由多个坡面组成。坡面类型除正常的以外, 还有受地质构造控制发育而成的, 即①倾向坡(参阅第七章第一节)(图6-2)。②断层陡崖, 是沿断裂线展布的陡坡, 通常是断裂破碎带区经强烈风化剥蚀、崩塌作用而成的一种构造地貌。北京南口镇一带有很好的断层陡崖。③断层三角面, 是断层破碎带发育而成的似三角形坡面, 它与断层陡崖不同, 是断裂破碎带的直接出露。在遥感图像上常成排出现, 形成直线状延伸的锯齿状。断层三角面出现在高角度正断层破碎带上(图6-3)。

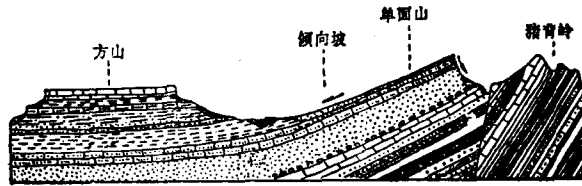


图 6-2 水平和单斜岩层的构造地貌
(据班达特, 1962)

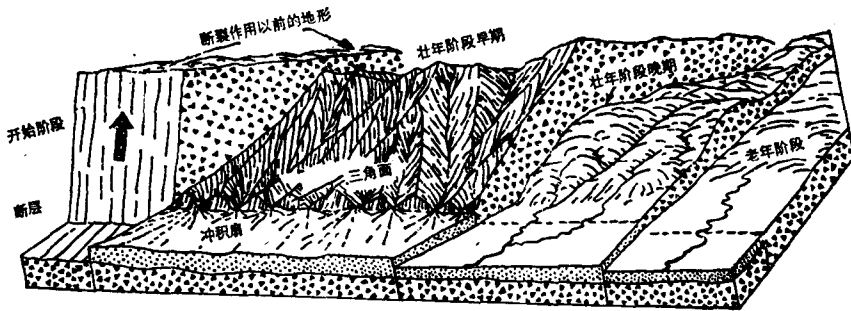


图 6-3 坡面构造示意图

三、构造盆地解译

与构造有关的盆地主要有: ①构造盆地, 即构造上是向斜, 地形上是盆地, ②断陷盆地, 它包括地堑构造形成的盆地在内, 主要与断块的下陷有关, ③火山构造盆地等。这些盆地在遥感图像上都有一个共同的标志, 就是其盆地总的轮廓与部份边缘明显受构造(主要是断裂)的控制。

第七章 遥感岩性解译与编图

岩石和松散沉积物是地质作用的物质基础，又是地质作用的产物。遥感图像真实地显示地面各种岩石的色彩与形态特征，为地质学宏观研究地表岩石的分布和地质找矿与地质制图提供一种新方法。依据遥感资料波谱与空间信息特征来判定出露地面的岩石物性和产出特点，就是岩性解译。内容包括：①建立岩性解译标志；②岩石的物性与类型、产出状况；③尽可能解译不同岩性的分界；④分析各种岩性展布状况、变化及其相互关系。

必须说明的是，本教材中所讲的岩性解译，是泛指岩性与岩类解译。实际上很多情况下解译的是以某种岩石为主的岩性组合的影像特征，即岩类特征。其影像特征都是通过某些典型区段或样区研究取得。由于成像条件不同，地质构造破坏，植被、土壤的掩盖等的干扰，岩性解译难度远大于地貌和构造解译。

第一节 岩浆岩的解译

岩浆岩的遥感解译效果较好。几何形态的主要标志是：①在图像上岩浆岩体具有比较规则的平面几何形态，常成圆、椭圆、透镜状、脉状等。②除少数熔岩外，岩浆岩多数缺少层理影像特征。③在遥感图像上出露规模较大的侵入岩，常具环状、放射状等类型的水系，节理或岩脉群。

岩浆岩的反射率高低、色调的深浅、与岩浆岩的 SiO_2 含量，色率的大小的正比关系非常明显。表7-1及图7-1都显示中酸性岩反射率最高，基性及超基性岩较低。岩石中铁镁质暗色矿物含量越高，反射率越低。但超基性岩常因风化退色而使反射率偏高。岩浆岩在可见光与近红外波段的波谱特征，与岩石中铁离子、羟基和水密切相关。在 $0.9\mu\text{m}$ 和 $1.0\mu\text{m}$ 处就存在有二价或三价铁的吸收谷，而在 $1.4\mu\text{m}$ 、 $1.9\mu\text{m}$ 、 $2.2\mu\text{m}$ 、及 $2.5\mu\text{m}$ 处的吸收谷则是长英质矿物液态包体内的水或 (OH) 吸收造成的。在红外波段，岩石从酸性向基性、超基性，吸收谷的位置也从 $9.8\mu\text{m}$ 移到 $11.0\mu\text{m}$ 处，即向长波红外方向偏移，见图2-14。

表 7-1

岩 类	花岗岩	花岗闪长岩	石英闪长岩	闪长岩	辉长岩	辉绿岩	纯橄榄岩
色 率	9	16	18	35	35	38	98
反射率	30—50	15—30	15—30	15—30	10—15		>10

一、中酸性岩体解译

(一) 中酸性岩体波谱特征

中酸性侵入体的反射强度是岩浆岩中较高的。图7-2中闪长岩、花岗闪长岩、黑云母及白云母花岗岩的反射比(ρ)分别为15—20%、30%、35%、40—45%。遥感图像上的色调除与暗色矿物含量有关外，还随粒度、风化程度、含水性、植被与第四纪坡残积物厚度而变化。

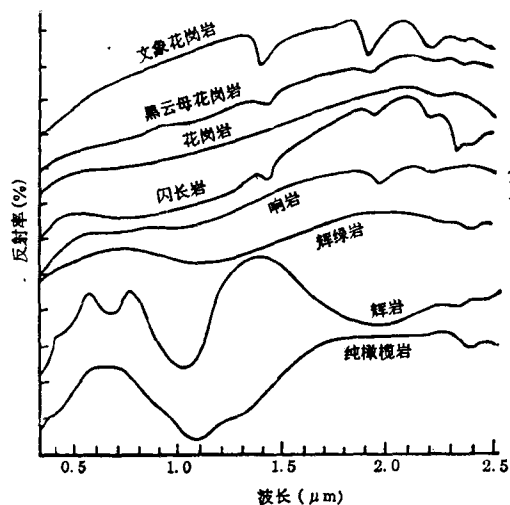


图 7-1 几种典型岩浆岩岩石的反射波谱特性曲线
(据Salisbury, J.W.和Hunt, G.R., 1974)

(二) 中酸性岩体几何形态

岩体的几何形态与岩体的规模及图像比例尺大小有关。大型岩基多成圆穹状、纺锤状或边缘不规则的块状。而单个中小型侵入体的岩株、岩枝、岩盘等常成圆-椭圆、透镜状、串珠状或大脉状(图版13, 27)。由于差异风化的结果,常构成下列地形地貌:①具有环形影像特征的穹状山丘,或在中低山地区内出现带有剥蚀残丘的丘陵盆地;②构成较特殊的影纹图案(如粗斑状、姜块状、鸡爪状);③由于球形风化和节理对冲沟、小水系发育的控制,钳状-树枝状菱格状-树枝状以及放射状、环状水系发育,在航片上显示更为明显。

(三) 中酸性侵入体遥感地质研究

近年来花岗岩类已从单纯从岩石成份研究扩展到以动态来分析花岗岩的上升、运移,定位等问题,开展下列几方面的探索性研究。

1. 利用花岗岩类的波谱特征来研究岩体的地质成因

杨柏林等(1987)把云南前寒武纪昆阳群内花岗岩的光谱特分为两类:其一是反射率较低(10—30%),并在1000nm处有宽的吸收谷;另一类是反射率较高(>30%),在1400nm, 1900nm, 2200nm处有明显吸收带(图7-3)。这两类花岗岩各测得六条波谱曲线,同类曲线波谱特征比较相似。据地质研究前者形成深度较大,属幔型花岗岩,后者侵入深度较浅,属壳型花岗岩。

2. 利用近红外遥感资料来快速推测花岗岩侵入体铁的成分变化

A.K. Baird (1984)认为花岗岩近红外波段(NIR)的波谱曲线区间斜率,直接与花岗岩侵入体的含铁量密切相关。其中主要是由暗色矿物(黑云母、角闪石等)内含的铁质(主要是 Fe^{++})造成的。全铁量增大,近红外反射波谱曲线斜率加大。对美国加利福尼亚州Lakeview山侵入岩体151个英云闪长岩粉末红外光谱测定(分辨率为10nm),与X射线荧光分析两种全铁重量百分值五次趋势面分析对比,其等值线的分布形态相当接近。作者认为 $1.6\mu m/1.05\mu m$ 近红外反射率在铁重量百分比值可用下列经验公式进行反求:

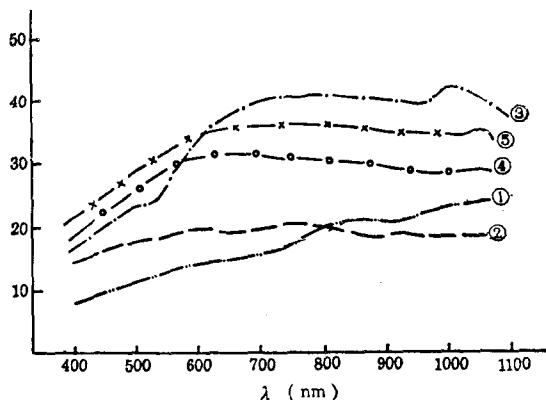


图 7-2 花岗岩成分序列岩石反射率特征曲线
(据中科院空间中心野外测试, 1986)

1. 正长岩; 2. 闪长岩; 3. 白云母花岗岩; 4. 花岗岩
长岩; 5. 黑云母花岗岩

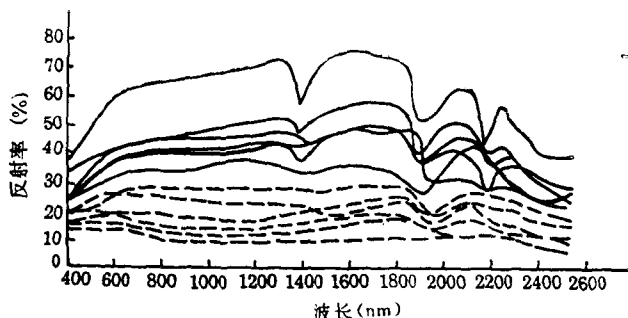


图 7-3 昆阳群分布区不同成因花岗岩反射光谱曲线图

(据杨柏林, 1987)

实线: 壳型花岗岩; 虚线: 幔型花岗岩

因关系密切。利用遥感资料上蚀变引起的色彩异常、环状构造等解译标志, 配合物、化探资料综合解译或进行信息复合, 对隐伏中酸性侵入体的解译相当有效。徐成彦、薛重生等^① (1990) 在 1:50000 区调遥感研究工作中, 按下述综合解译研究的步骤: ①遥感图像上的环状构造解译及其成因分析; ②与物、化探圈闭异常的对照分析, 航磁数据延拓资料解析, 化探特征元素及元素组合异常分析; ③区域的及深层构造分析; ④隐伏岩体侵位机制及岩石类型分析等。揭露出京郊研究区内多个隐伏侵入体 (如南窑—西安子隐伏花岗岩体), 以及第十一章第三节对内蒙东部岩浆带 (图版 2) 和南岭、香花岭隐伏花岗岩体的研究 (图版 70)。

4. 对花岗岩岩基的内部构造与围岩构造遥感研究

地质学对花岗岩岩基的研究在皮彻尔等人的倡导下, 为解决岩基、岩浆带的发育特点, 强调对花岗岩岩基的内部构造、岩体的几何形态 (平面的、剖面的)、围岩构造的研究。这是分析岩基的发育特点和侵位机制所必需的。编者对太行山王安镇岩体的研究表明, 遥感图像具有视域大、能立体观察的特点, 相当有效地给出岩基的几何形态及岩体侵位前后断裂的区分。

遥感等多源信息的复合, 更能把隐伏及岩体深部几何形态揭露出来 (图版 70)。图版 71 东北角广东姑婆山岩体, 清晰的岩体形态、晚期褶皱产生的近东西向线性构造、南北两侧的古生代地层走向及褶皱轴向的对应, 很好地显示了岩体是膨胀气球式的侵位特点 (Pontual, A., 1989)。

二、基性、超基性岩解译

大型的基性、超基性岩侵入体不常见。外形多为团块状、链状、大脉状沿区域性大断裂、强烈褶皱带、板内构造缝合带呈带状产出。新鲜的灰长岩、橄榄岩颜色暗、反射率较低, 黑白图像上呈现暗色调, 但这类岩石的铁镁质暗色矿物极易遭受风化而褪色, 形成洼地。难与围岩分开, 不容易解译。这在新疆克拉玛里超基性岩带 (干旱气候) 以及滇西红河构造带上的超基性岩体 (温热气候) 都有近似的解译标志。零散小型超基性岩体及基性岩脉都很难识别。对基性与超基性岩的解译要领是: 应当充分利用航空重磁与遥感多源信

^①徐成彦、薛重生等, 1:5 万区调中根据遥感图像识别岩性的方法技术研究报告, 中国地质大学 (武汉)

$$\text{铁总量(重量百分比)} = \frac{(\text{NIR}1.60\mu\text{m}/1.05\mu\text{m}) - 1.046}{0.082}$$

作者认为可以利用上述波段的遥感资料来推算花岗岩体的全铁量, 进而预测花岗岩体的组成及其变化。

3. 利用多源信息复合资料来揭露隐伏花岗岩体

岩枝、岩株、岩瘤等中小型中酸性侵入体与许多金属矿床成

息复合资料、并配合区域大型构造解译资料进行,以提高解译能力。Aarnisalo,J(1984)认为利用主成份分析增强处理具有强磁性的铁镁及超铁镁岩都有淡黄绿到青蓝色彩而易于识别。利用遥感资料来找寻与解译金伯利岩时,因为金伯利岩体规模较小,解译的要领是揭露作为导岩、储岩的区域断裂。

三、脉岩解译

岩脉是分布较广的浅成小侵入体。其重要的解译标志是:①岩脉常成群、定向,以平行、雁列、共轭、环形、放射状等组合形式产出。单条岩脉多成长条状、链状和透镜状。②成群脉岩受区域断裂控制、沿某些区域断裂方向展布。③花岗岩、伟晶岩等长英质岩脉色调浅、抗风化能力较强,常构成线性垄岗、陡壁。辉绿岩、煌斑岩脉色调常较围岩稍深,易风化成长狭沟谷,线性槽地(图7-4,7-5)。多组暗色调基性岩脉侵入在花岗岩体内。平行岩体边界环状脉岩受岩体原生节理控制。

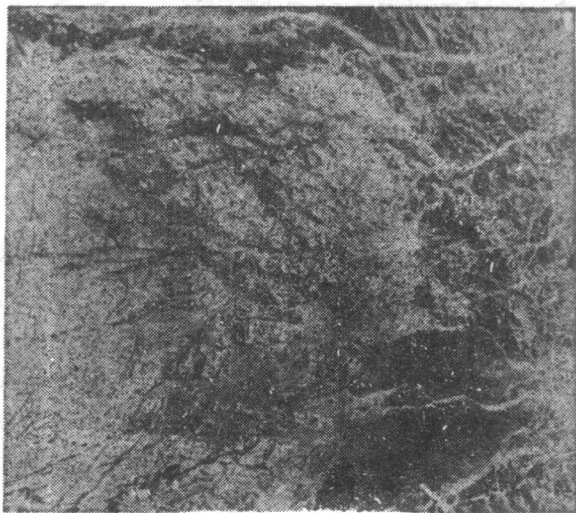


图 7-4 航片H-151

脉岩有时含金、宝石、稀有金属而成为矿脉。老变质岩系内辉绿岩墙群可以作为前寒武纪古大陆聚散过程中,陆块内构造形变场与构造环境特征的一种标志,是古板块构造研究的一个内容。

四、火山岩类解译

不同条件下火山岩类的解译效果相差很大。对近代火山锥、熔岩流、火山湖的解译,如我国五大连池、腾冲、大同许堡等处的火山机构的解译、效果极佳。对火山锥的空间展布、与区域断裂关系,多次喷溢熔岩的划分和流动特点都十分清楚。夏威夷现代火山在MSS图像上,岛中央纳罗亚火山夜间热红外(8—14 μ m)图像上,从-7℃到

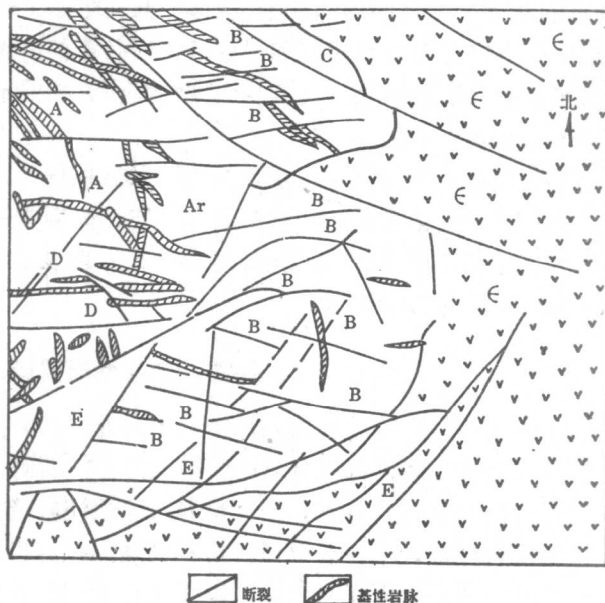


图 7-5 航片H-151地质解译示意图
(据史继忠)

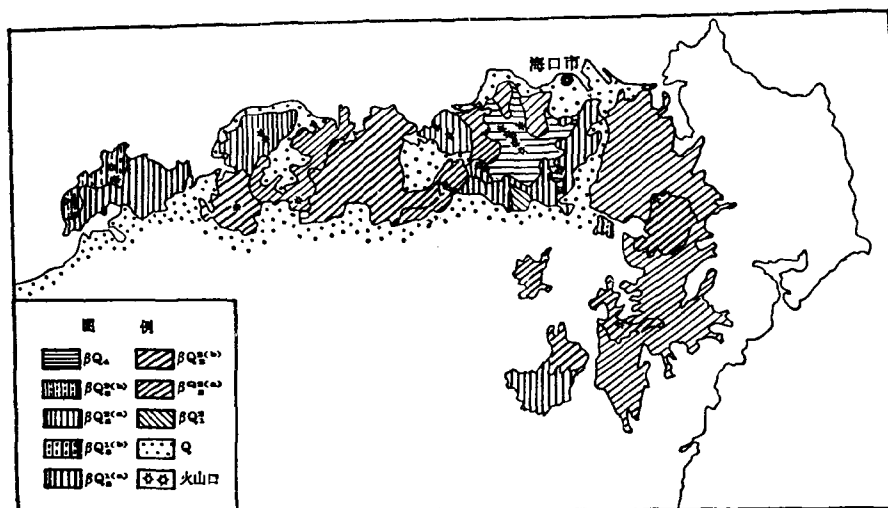


图 7-6 海南岛北部第四纪火山岩分布图

(据傅秀根, 1981)

Q₁: 第四纪沉积物; βQ₁到βQ₅: 不同期次的玄武岩类第四纪熔岩

+8℃分为六个温度等级的火山岩, 各次熔岩流以不同色调显示得十分清楚(图版14)。

内蒙第三纪汉诺坝玄武岩、云贵高原上二叠纪峨眉山玄武岩等大面积分布的中基性、基性熔岩、在小比例尺的卫星图像上大多构成熔岩台地或低缓的穹丘状地形。其上叠加桌状山、穹状山, 其边缘带发育陡崖、陡坎、以及火山锥、火口湖等中小型构造地貌, 则只在大比例尺航片上可以看到。雷州半岛及海南岛北部第四纪玄武岩据色调、地形、植被及影纹特征可以分为五期(图7-6, 图版64), 其中第二、三期(Q₂、Q₃)熔岩分布较广、风化较深, 地势相对较低。第四期为气孔状橄榄玄武岩、玄武质凝灰岩组成, 地势高、植被浓密。这些熔岩在大比例尺上还可以看到陡坎, 与喷发活动有关的蜂窝状坑塘。闽中石牛山地区中生代安山岩, 粗面岩类构成的熔岩盆地、蠕虫状、斑点、斑块状影纹, 放射状的线性构造, 树枝状与角状树枝状水系都与周围岩性影像特征明显不同。

火山碎屑岩大致可以分为较粗的火山角砾岩和火山集块岩、凝灰岩两类。大片凝灰岩多数与熔岩夹叠在一起。浙江中部中生代安山岩、粗面岩类凝灰岩地层的出露地区。风化及含水性不同, 卫星像片上地形地貌、植被发育、色彩差异很大、解译程度较低。

第二节 沉积岩与松散沉积物解译

地球表面沉积岩分布最广, 又是煤、油、铁、铝、建材矿产的母岩。通过遥感资料解译与分析, 识别岩石的性质、产状、展布, 进而分析它的时空变化及其与其它地质体的相互关系, 对区域地质特征的认识和找矿都具有重要意义。

一、沉积岩基本解译标志

沉积岩的色彩、色调和图形特征是基本解译标志。在可见光和近红外波段, 碳酸盐岩反射率较高。泥岩尤其含有机质的泥质岩反射率就较低(表7-2)。沉积岩中含暗色或杂

表 7-2 沉积岩的化学组成和光谱反射率

含量 岩石名称 (%)	化学元素	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	H ₂ O ⁺	H ₂ O ⁻	光谱反 射率 (%)
灰岩		1.22	—	—	0.06	0.09	0.05	0.38	55.60	—	0.03	0.10	0.08	60—80
白云岩		0.21	0.09	0.38	0.02	0.15	0.05	23.08	29.81	0.52	0.07	0.08	0.15	80—85
泥岩		61.09	0.60	16.75	5.30	2.07	0.03	2.27	0.55	0.52	5.12	3.61	1.39	20—25
砂岩		85.86	0.21	7.09	1.86	0.39	0.04	0.24	0.11	0.60	1.61	0.98	0.17	60左右
钙质砾岩		5.91	—	1.06	0.02	0.13	0.04	0.48	52.00	—	0.17	0.34	0.15	40—75

(据杨柏林, 1986)

色碎屑矿物多, 含有机质, 三价铁、锰的氧化物较高, 孔隙和裂隙较多, 湿度或含水较大, 其反射率就较低, 在黑白遥感图像上色调偏暗。反之, 则色调偏灰白。

可见光、近红外波段的光谱特性, 与岩石内的铁、碳酸根、羟基离子及水密切相关。图7-7示出几种沉积岩的反射波谱特性曲线。图中的大多数曲线都在2.35 μ m附近出现CO₃²⁻的特征吸收带, 以及在1.1 μ m之前出现铁离子的吸收带。由于岩石中存在铁离子而导致曲线朝向蓝光端下降的趋势也十分明显。岩石中含有不同量的水和羟基离子, 也清晰地由波长为1.4 μ m, 1.9 μ m和2.2 μ m的吸收带的强弱反映出来。如图7-7中的红色砂岩、含伊利石灰岩、泥质页岩及含化石灰岩。多波段航、卫片的单波段黑白图像, 雷达图像及红外图像的色调特点及其变化视具体情况而定。

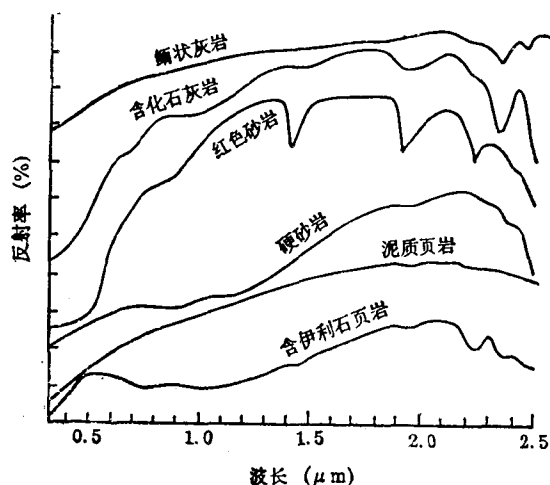


图 7-7 几种沉积岩的反射波谱特征曲线

(据Salisbury, J.M.与Hunt, G.R, 1974)

与HCMM卫星资料的复合, 岩性及层理十分清楚。

层理是沉积岩最重要的图形特征, 层状产出造成的带状影像特征。层理构造, 风化剥蚀后形成的岩层之角面和陡崖、陡坎在遥感图像上有时显示得十分清楚。这取决于下列因素: ①该沉积岩系与相邻岩层颜色差异是否明显; ②岩层差异风化产生的微地貌是否显著; ③地面植被和表土掩盖程度(与岩层的含水性、坡残积物成份有关); ④成像地段岩层产出状况、地形、光照条件与成像照射角度等。层理在遥感图像上显示为朵状、直线、弧形等几何形态, 具有不同色彩(或色调)与宽窄不同、断续或连续的条带和影纹。如图版13, 图版71, 67, 彩版14是北非TM

二、主要沉积岩解译特征

(一) 粗碎屑岩解译

粗碎屑岩包括中粗粒砂岩、砾岩、含砾砂岩等。这类岩层坚硬、抗风化、成层性好, 性脆而节理(尤其是垂直岩层走向的张性节理)发育, 节理与层理对微地貌微水系的控制

较明显。常构成桌状山、平顶山、猪背岭、鬣岗、单面山以及垄状小山脊（图版65）陡崖、阶梯状陡坎等地形。水系以羽状、菱格状—树枝状为主，密度较小，其末级小水系的发育明显受局部层理和节理构造的控制。如果大片粗粒碎屑岩出露，岩层三角面反而发育不好。但是如在新疆昆仑山山前第三纪砂砾岩那样，砂砾岩杂夹在抗风化能力较差的岩层内，或互层产出，因差异风化而构成明显的岩层三角面和层理，可以作为解译和地面追索的标志层。粗碎屑岩有时因球形风化和沿陡崖崩塌等原因，在全色黑白图像上呈粗糙的斑块或斑点状影纹。在长江和珠江流域、由砂砾岩组成的中生代“红层”，产状平缓、层理不明显，风化表面强烈铁染，红层中的含钙质砂砾岩球形风化后，构成类似岩溶峰林地形的特有的丹霞地貌，易于识别。

（二）粉砂岩、粘土岩解译

颗粒较细的粉砂岩，按岩石学的分类应属碎屑岩类，但影像特征与粘土岩、泥岩、页岩相似，其解译特征可归为一类。这类岩层大片出露地区显示的影像特征是：①波状起伏的地形上，分布有大小不等，地形的相对高差不大，分水岭浑圆的“馒头山”。（图版65，71）。②由于粘土岩类的透水性较差，故地面的水系密度大，为典型的树枝状水系，地面水体多（小湖沼、小河等）。③植被、耕地和村落多，常常是经济开发相对较好的地域。④由于这类岩层颜色多样（如黑灰、紫红、灰棕、棕黄等），在遥感图像上构成色调、色彩不同的纹带，断续隐约展布。夹杂在抗风化能力较弱的粉砂岩、泥岩和粘土岩类中的砂砾岩和灰岩夹层或透镜体，常构成清晰层理和岩层三角面。如华北地区下寒武统馒头组页岩内的灰岩夹层。⑤低山丘陵地区常有蠕虫状、姜块状、细菱格状影纹图案，这是这类岩性的显著解译标志。

煤系地层大多以粉砂岩、粉砂质页岩、砂岩和粘土岩为主。可以利用岩层热特性的差异来区分岩性，揭示地面煤层的露头。表7-3为太原市西山地区石炭二叠系地层各种岩石辐射温度周日温度变率（设该地区井水辐射温度日变化量为1）。煤系及黑色页岩的辐射温度日变量分别为47℃、32.5℃，周日温度变率为8.4，4.9。煤层白天较周围岩石温度高，夜间温度低，因而在夜间成像的图像上呈暗色调，容易识别（图7-8，图版67）。

表 7-3

岩石 名称	煤层	黑色 页岩	褐铁 矿	黑色 页岩	灰色 砂岩	黄色 砂岩	铝土 矿	灰色石 灰岩	井水
周日 变量(°C)	47	32.5	28.5	26.4	33.1	37.7	22.2	20.2	?
日变温率	8.4	4.9	3.9	3.8	3.6	3.3	2.3	1.6	1

（据管海晏）

（三）碳酸盐岩解译

碳酸盐岩在我国南方有广泛出露。由于碳酸盐岩景观主要与溶蚀作用有关，因而干旱与湿热地区相比，其景观特征与解译标志有明显差异（表7-5）。

在云贵高原热带，亚热带高温多雨条件下，滇、黔、桂地区大比例尺遥感图像上，峰林、漏斗、落水洞、坡立谷、暗河、溶蚀盆地发育，显现十分典型的岩溶景观，岩性解译可信。但要进一步把不同成份的碳酸盐岩细分并标绘其地质界线，难度就较大。

碳酸盐岩的化学和矿物成份不同，导致波谱曲线的形态、碳酸根的吸收谱带位置和反

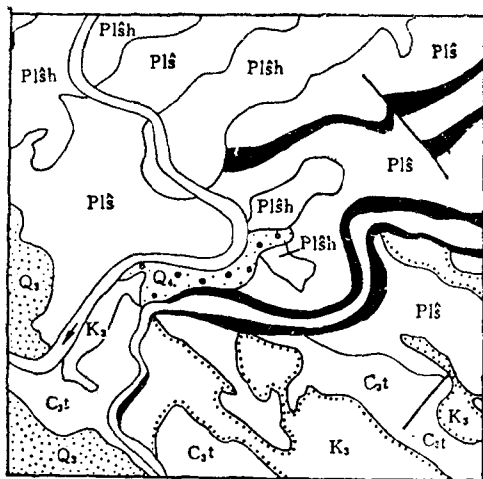


图 7-8 山西太原西山矿区地质图 (局部)
(据航空热红外遥感图像集, 1988)

- 1.砂砾、砂土; 2.粉砂土; 3.砂岩泥岩;
4.砂岩泥岩; 5.下石盒子组砂页岩, 薄煤层;
6.山西组粉砂岩, 炭质页岩夹煤层; 7.太原组,
黑色页岩夹煤层; 8.煤层; 9.不整合界线;
10.断层; 11.河流

- 射率不相同 (表 7-4), 在遥感图像上色调
深浅就不一致。此外白云岩、硅质灰岩、
硅质白云质灰岩较之泥灰岩、纯灰岩, 在相
同的自然条件下 (如图版 71 在同一幅图像
内), 由于溶蚀速度不同, 造成岩溶地貌发
育完好程度有差异。图版 63, 是广西某地晚
泥盆世碳酸盐岩区的航空像片, 图像东北
侧为灰岩, 色调灰黑, 峰林地貌发育很好,
而图像中央及东南角, 分别为灰岩夹硅质
团块状灰岩及白云岩, 硅质灰岩。色调浅,
具龟裂影纹, 岩溶地貌不好, 水系不发育。

在小比例尺卫星图像上, 贵阳东为石
炭纪生物碎屑灰岩, 色调深、植被较发育,
米粒状岩溶峰林形成海拔高度相近峰林群
(图版 71 中部)。宏观上看呈花生壳形影
纹, 但仍能看到成串峰林规则的分布, 显

示出层理及线性构造。下部以燧石灰岩、硅质灰岩为主, 夹砂页岩, 色调浅, 峰林地貌不
明显。而二叠纪由灰岩、硅质灰岩、页岩、煤层组成地区色调浅, 地形低平, 岩溶峰林带
状分布, 把层理构造显示得十分清楚。象广西、贵州一带小比例尺卫星图像上的碳酸盐岩大

表 7-4

样品名称	反射光谱特征 及元素 含量	曲 线 特 征	碳酸根吸收谱带位置 (nm)			
			V	IV	III	II
碳酸盐岩石		曲线平直	1870—1880	1970—2000	2100—2120	2300—2350
含铜白云岩		可见光区斜率大, 曲线呈马鞍形	1860	1980	2140	2320
白云鄂博白云岩		可见光区斜率大, 曲线呈马鞍形	—	—	—	2350
南京六合白云岩		可见光区斜率小, 曲线平直	1840—1860	—	—	2300—2320
长江中下游大理岩		可见光区斜率小, 曲线平直	1860—1900	2000—2020	2160—2180	2340—2360
长江中下游灰岩		曲线平直	—	—	2200	2340

样品名称	反射光谱特征 及元素 含量	碳酸根吸收谱带 位置 (nm)	元素含量 (%)					
			I	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	MgO
碳酸盐岩石		2500—2550						
含铜白云岩		2500	13.81	1.49	0.43	0.98	15.97	28.43
白云鄂博白云岩		2500	2.86	0.12	0.50	3.26	16.74	33.25
南京六合白云岩		2500	0.21	0.38	0.02	0.15	23.08	29.81
长江中下游大理岩		2500	0.32	0.12	0.75	0.13	1.49	53.92
长江中下游灰岩		2500	1.15	0	0.03	0.15	0.42	55.34

(据杨柏林等, 1987)

片出露区,用影纹图案进一步划分碳酸盐岩就比较有效(图版72,图7-9),当前对碳酸盐岩的进一步划分,主要利用多波段遥感资料(见本章第四节例子)。

干旱气候条件下,溶蚀作用弱,在遥感图像上岩溶影像特征极不典型,大片碳酸盐岩发育区内色调浅,峰脊分水岭尖棱、层理不明显,植被及水系稀疏,详细解译不易。但要指出的是,我国华北、西北局部地区有时也有较好的岩溶地貌,如太行山著名的狼牙山区,但它是由于地壳抬升,已停止发育的古岩溶产物。

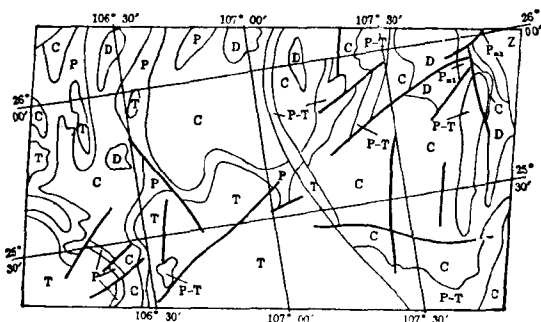


图 7-9 贵阳幅MSS图像地质解译示意图

(据史继忠)

地形形态、色彩和色调,影纹图案以及规模大小(注意图像比例尺)。

(一) 黄土解释

黄土地区塬、梁、峁特殊微地貌,以及由它组成的菱格状、条块状影纹图象,在陕北、吕梁山区,汾河谷地的卫星象片黄土较易与基岩及其它沉积物区分开来。大比例尺航空象片上“U”形冲沟,发育的陡崖及崩塌地形、树枝状、格状树枝密度较大的水系,均匀的浅色调都是黄土的解译标志。

(二) 流水成因的松散沉积物解译

利用高分辨率的航片及增强处理图像资料,对宽阔的河谷松散沉积物进行划分。沙滩两岸的干沙层色灰白明亮,粘土淤泥地区灌丛植被和沼泽较多,平坦的河滩及迂回扇上细的水道,阶地,洪积扇前缘的粘土沙层平整地面,均匀色调,规则的农田及居民点,都可以帮助判断其物质组成。湿沙层色调暗,局部砾石层则色调不均匀,斑点状影纹,粗糙的表面,植被只局部地段生长良好。彩版Ⅲ左上的北部淡蓝色的洪积扇,红色是红柳等植被茂盛的河滩,都深蓝色的荒漠,其蓝色是沙漠漆的反射造成的。

(三) 干旱地区风沙、盐碱沉积物解译

我国西北地区主要松散沉积物有风沙、盐碱、山前大片出露的坡残积、洪积扇(裙)及河湖堆积几种。柴达木(图版23),塔里木和准噶尔盆地周边山前坡洪积物,上面发育无数近于平行洪水冲击细沟,灰黄颜色、浅灰色调是粘土砂质松散沉积物标志。如果是砾石层,则因砾石表层铁锰质“沙漠漆”形成暗色调和彩色红外航片上蓝色色彩。

洪积扇及多个相连构成的洪积裙,其典型构成是扇顶端为砂砾层,粗糙而色暗、中段为细砂、粘土层,是绿洲的主要地段。前端是白色盐碱土及少数沼泽灌丛地。

柴达木盆地实测地物光谱反射曲线表明,各种沉积物均有比较相近的反射波谱曲线。而钾、钠盐及芒硝却有很高反射率。咸水、淡水、卤水在0.6—0.7 μ m波段差异很大,在

三、松散沉积物解译

第四纪的坡积、残积、洪积和淤积物分布非常广泛,我国西部干旱地区的风成沉积、黄土(黄土是未结固的岩石),盐碱沉积物(图版23),以及沿江-沿海的各种松散沉积物到处可见。利用遥感图像来解译和编图、快捷而省廉。

松散沉积物主要解译标志包括:沉积物所在地的地貌类型、组成的地

图版23左下侧的湖水颜色也不同。湖泊区的同心环状不同色带,反映湖盆沉积范围的变化及其成份。新疆塔克拉玛干沙漠区,可以用MSS图像对沙丘的几何形态进行地貌分类。

第三节 变质岩解译

区域变质岩是变质岩类中分布最广的岩石,是遥感解译的主要对象。接触变质岩和动力变质岩类分布不广,规模小,并只在某些特定地质构造地段内出现。

区域变质岩在遥感图像上的基本特点是,如果原岩为岩浆岩时,其影像特征与岩浆岩解译标志相近。原岩为沉积岩的,尤其是轻微变质的沉积岩,其影像特征与沉积岩极难区分。原来岩性并不相同的受变质的岩石,随变质程度提高,无论从化学成份、矿物组成、岩石结构和构造都渐趋一致,尤其是混合岩化和深变质的岩石,其波谱特征,地貌景观都相差不大,增加地质解译的难度。

一、区域变质岩解译

变质岩在可见光、近红外、短波红外波段($0.4-2.5\mu\text{m}$)的反射波谱特征,主要是铁、锰、铜等金属离子和羟基、碳酸根离子及水所引起的。图7-10显示出变质岩中大理岩、石英岩、片麻岩、板岩及片岩的反射波谱曲线。岩石中所含的铁、锰离子导致曲线的蓝光段的斜率增大,并在 $1.1\mu\text{m}$ 之前出现明显的吸收带。图7-10中所列的岩石均在 $2.2\mu\text{m}$ 附近和 $2.35\mu\text{m}$ 附近,分别出现羟基和碳酸根离子的强吸收带。其中角闪片岩,还在 $1.4\mu\text{m}$ 附近出现羟基离子的倍频带。蛇纹大理岩谱中出现羟基的 $1.4\mu\text{m}$ 的吸收带及其附近的 $1.37\mu\text{m}$ 处和 $1.3\mu\text{m}$ 处的吸收带,它们与 $1.4\mu\text{m}$ 的水吸收带相重叠,从而使 $1.4\mu\text{m}$ 处的谱带为强吸收的锐带。

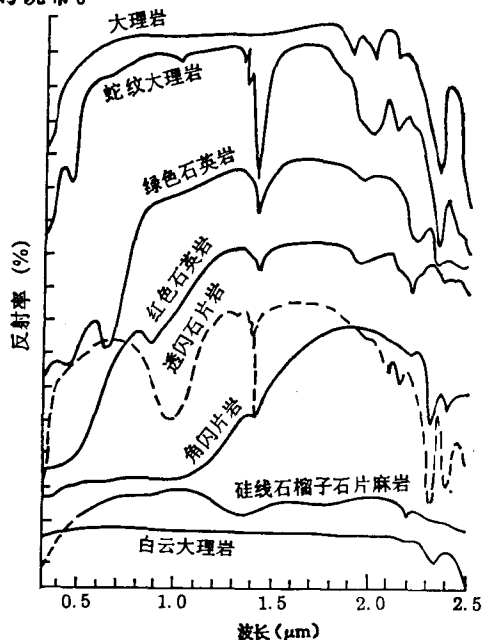


图 7-10 几种变质岩的反射波谱特性曲线
(据Salisbury, J.W.和Hunt, G.R., 1974)

区域变质岩主要解译标志有:①变质岩石的微地貌、微水系及冲沟的发育,常受劈理、节理的控制。②在遥感图像上有时会看到隐约显示的细的纹线构造。③区域变质岩区内,有时会观察到很好的大理岩、石英岩、磁铁石英岩夹层,并构成坑脊状突起的正地形(注意:脉岩也会构成这类地形)。绢云母、绿泥石、滑石、石墨片岩、千枚岩的夹层则构成线状的槽、沟地形。色调色彩也和周围变质岩系有差别。④风化剥蚀的结果,在遥感图像上,会形成象谱和的皱纹状,密集的蠕虫状等几何形态的影纹图案,以及环状、弧状构造标志。⑤变质岩系内常常有未变质的沉积盖层不整合其上,或晚期侵入的岩体,脉体,在区域变质岩发育地区,单调的景观显得构造上不协调而格外

醒目易于识别。(图版66)为太行山地区元古代长城系石英砂岩层角度不整合覆盖在太古代深变质岩系上。图像中部隐约可见S形条带,是深变质岩强烈褶皱变形的结果。

区域变质岩中,变质较浅的千枚岩及板岩,其影像特征与页岩、粉砂岩极为相似。片岩的影像特征,与片理构造发育程度、矿物组份关系密切。片岩、千枚岩和板岩大片出露地区可能观察到劈理、片理风化剥蚀而成的细线纹,可能看到深浅不同的飘带状色带和其中夹层。可能看到丰字型水系及较尖棱的分水岭。在大比例尺航片上,还可能看到鳍脊状分水岭投落的参差不齐的分水岭阴影。

片麻岩、麻粒岩、混合岩等深变质区域变岩系与中酸性侵入岩的影像特征很相似。确定深变质岩的存在不易,细分它们就更难。这类岩性大多易风化剥蚀为低山丘陵。树枝状、钳状—树枝状、丰字型,似肋状水系为主。倒石锥及大面积的球形风化在航片上构成粗斑状影纹,都是常见的影像特征。

二、其它变质岩解译

动力变质岩带的分布总是局限在非常狭小地区。个别如郯庐断裂及哀牢山断裂带也能见到较有规模的构造破碎地带(图版7)。容易风化为较低地形,松散分水,植被不发育,并沿区域大断裂带展布是主要解译标志。韧性剪切带的及热液蚀变类的解译在构造及矿产解译中加以说明。

第四节 岩性识别方法与解译要领

一、岩性解译特点

遥感技术要在区域地质研究,矿产资源勘测,地质图体编制工作中发挥作用,岩性识别是其基础。但岩性解译要比地貌、构造解译难。因为:①卫星遥感每次成像的面积都较大,在一幅 $185\text{km} \times 185\text{km}$ TM图像范围内,其成像条件如自然地理环境(海拔、地形、气候)、光照条件(阴、阳坡)、含水性,植被与土壤掩盖的程度、地质构造都会有改变,导致岩性解译标志的变化。②需要解译的某一种岩性,常常因为原始厚度不大或后期构造的破坏,出露面积较小,难以形成能在图像上反映其物性的色调、水系、微地貌、影纹图案等影像特征。③岩性的物质组成,结构构造的横向变化,或后期岩浆活动、蚀变、叠加变质作用,风化作用引起的变化,都会引起解译标志的改变,影响解译效果,因而更应注意解译技巧与要领的应用。

二、岩性解译要领

(一) 目视解译是岩性解译的基本方法

正如前述因素造成的影响,即便在同一地区或同一幅图像的范围,由于局部遥感成像条件发生变化,物性相近的岩层(如砂岩)的地物波谱特征也会有较大差异,出现同物异谱的现象。需要正确应用解译标志和解译技巧,排除各种干扰。解译要循序渐进,先区分基岩与松散沉积物;再区分三大岩类(水、火、变);再从典型样区出发,进行岩性细分。就是图像增强方法的选择,也应当在目视解译的基础上设定方案。

(二) 航空像片是目视解译基本资料

航片有很高地面分辨力,黑白航片是基本覆盖全国的一种测绘资料,是进行详细岩性解译和建立区域岩性解译标志的基础影像资料。《地体分析》一书(D.S.Way, 1973)详细列出三大岩类,各种主要岩性在湿热和干旱气候条件下的主要解译标志(图7-11表示相同岩性与构造,在不同气候条件,其地形地貌与水系特征都有差异,是很有参考价值的解译指南。岩性、岩性—地层的解译标志主要有:①色调或色彩;②地形地貌;③冲沟和水系的类型与密度;④影纹图案特点;⑤植被发育与土地利用情况;⑥能直接从图像上观察到的层理、夹层、节理等地质构造现象等项。表7-5是三大岩类重要解译标志。请注意对比与应用。

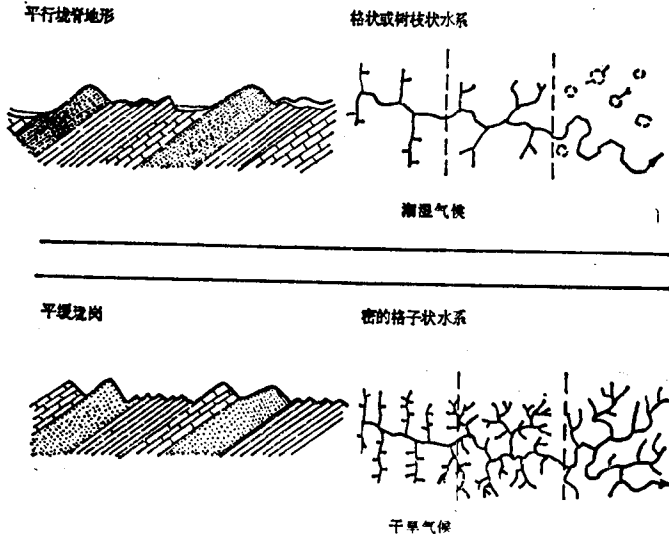


图 7-11 在潮湿和干旱气候条件下单斜岩层的地形、水系解译标志
(据D.S.Way, 1973)

(三) 充分利用对比来提高解译能力

解译要通过相关分析与特征对比来进行。对比解译的内容包括:与典型样区对比;与不同类型的遥感图像上同名地物影像特征的对比;与同类岩性在不同地段的影像特征的对比;与不同岩性的影像特征进行对比。图版65及图7-12是我国西南沉积岩发育地区的黑白航片及其解译地质图。在轴向NE-SW背斜的两翼,对称出露页岩、灰岩、砂岩与粉砂岩岩层,为各种沉积岩的影像特征对比提供很好实例。碳酸盐岩以岩溶地貌,砂岩性脆而抗风化能力较强,尖棱分水岭,垂直岩层走向的张节理和受控发育起来的平行羽状小水系,页岩“馒头山”的低山丘陵,较密的末级水系,为其特征,三种岩类较易区分。

(四) 正确选择岩性解译典型样区

岩性解译应当从易到难,从已知到未知,从较典型地区开始,通过对比解译,选出样区来。选典型样区的目的:①把每一种岩性解译单位的典型影像特征具体地展示出来。②为图像处理的训练区的挑选作参考,③为需要进行岩性的地物波谱测试时,测试地点的选择作参考。典型样区有综合标志和单项标志典型样区两类。单项的如各种岩性的水系类型(孟伟,1990)。桂林地区古生代碳酸盐岩发育区的热红外典型影像(茹锦文[●])。综合的如陕北神府煤田煤系地层的影像特征(崔林生,1988)。图7-13是印尼SAR图像的不同岩

[●]茹锦文等,桂林—阳朔机载热红外扫描在岩溶地质、岩溶水文地质中的应用,1984

表 7-5 不同岩石类型的黑白航片解译标志与比较表

标 岩 性 志		色 调	地 貌	水 系	植被与土地利用	其 他
沉 积 岩	砾 岩	斑点状、斑块状等不均匀的深色调	沿主要节理发育方向形成陡崖、峭岩、垄岗,分水岭尖峭嶙峋,地形崎岖不平	地面裂隙发育、透水放水系不发育	基岩出露区植被不发育或线状展布、耕地少	层理不发育,影象表面结构粗糙,多崩积物,阴影发育
	砂 岩	浅灰色调,植物丛生的砂岩或铁质砂岩呈深色调	陡峻奇峰,常形成陡崖、峭岩、垄岗,单面山或猪背岭,山脊走向稳定,岩层三角面发育	中等密度的树枝状、格状及角状水系,冲沟短、陡、切割深,呈“V”形	树木、耕地少,仅集中于河道、沟边	可据砂岩稳定、延伸远、特有地形、水系而作标志层
	页 岩	暗灰色带斑块或隐约的带状影纹	低矮圆滑、馒头状山丘,平缓盆地、坡地、开阔洼地	典型树枝状及平行状水系,紧密相间,河网自由摆动,冲沟短、密、圆滑、呈“U”形	质软、残积层发育,土壤较厚,村镇、路、林、耕地多,是很好的农作物区,边坡树林覆盖	易风化多残、坡积物,呈浅色斑块村落居民点多
	碳酸盐岩	干旱区 较单调的浅色调	可呈陡峻山势,岩溶地形极少见	水系不发育,冲沟细小	植被稀少,无重要耕地与村镇	分水岭尖峭,基岩裸露,坡残积物少
		潮湿区 偏浅、杂斑状有植被时多呈深色调点状	发育以溶蚀作用为主的岩溶地貌	内向水系,干流曲折明显而支流稀疏狭窄,冲沟短、浅	植被茂盛,农田、村镇、道路集中在河谷内	裂隙均匀分布,并成组出现
	侵入岩	均匀、随岩性(酸性—基性)色调从浅—深变化	穹形、浑圆形、低缓、圆滑丘陵或较高山地。球形风化发育	稀疏树枝状、环状、放射状水系,明显受裂隙控制	植被沿裂隙呈带状分布耕地、村落、道路较集中	无层理、有岩相带,围岩蚀变带,岩体长轴常与构造带走向一致
岩 浆 岩	喷出岩	暗深(中基性)或浅灰(中酸性)具斑纹状	火山地貌,舌状熔岩流、桌状山垄岗或台地、独具火山机构和流动构造表面粗糙不平	树枝状、环状、放射状、平行状水系,峨嵋山玄武岩具蠕虫状水系	植被稀少,并成带状分布,土壤层不发育	玄武岩独具柱状节理,构成悬崖可作标志层
	板岩、片岩、千枚岩	色调变化范围大。但较均匀	低缓丘陵或岗状地形、定向性、连续性较强	栉状、梳状、格状水系较发育	易风化崩落,残坡积物发育(显均匀浅色调)	菱形线性构造醒目(影象为平行密集线纹代表板理、千枚理方向)
变质岩	片岩混合岩、片麻岩	浅色调,暗色矿物集中带为暗色条带,不同色调组成的细线纹呈现“片麻状”影纹	低矮浑圆的岗峦,分水岭杂乱无章,表面光滑	树枝状或“丰”字形水系	表土深厚,残积层发育,植被、耕地及林木集中	不连续、波状扭曲的细影纹线理、景观单调

(据张德英等,1986,补充修改)

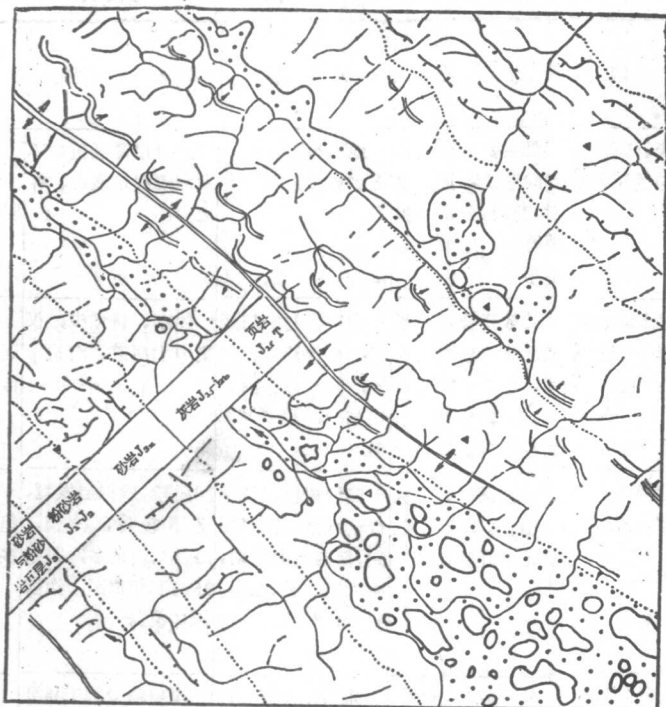


图 7-12 H-102航片地质解译示意图

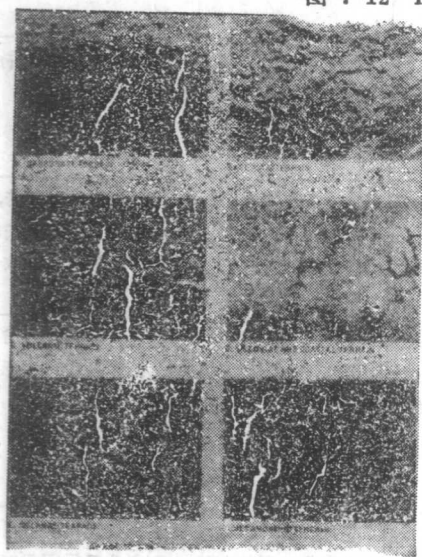


图 7-13 印度尼西亚SAR图像的各种岩性典型样区

(据F.F.Sabins, 1987)

性的典型样区，样区的选择原则是：岩性影像特征（单项或综合的）有代表性；样区所在的自然地理环境有代表性。

（五）充分利用地物波谱资料

罗曼等人（1977）利用在美国内华达州金场地区野外测得的蚀变岩（284个数据），未蚀变岩（342个数据）的波谱资料，指出 $1.6\mu\text{m}$ 及 $2.2\mu\text{m}$ 是两种岩性最大与最小反射比的差值。因而选用 $1.6\mu\text{m}/2.2\mu\text{m}$ 比值图像把两者很好区分开来。是利用波谱资料识别岩性的很好实例。文章中也列出各种岩性的地物波谱曲线以供参考。通过地物波谱曲线的对比、研究，①来分析各种因素对波谱特征的影响，判别解译区各种岩性可解译程度；②为正确解译波谱特征提供依据；③同时对比不同岩性的曲线上的吸收谷、反射峰所在的波长与反射强度等特点（参阅第二章第四节的

内容），供图像处理方案的设计作参考。

（六）利用多波段、多平台遥感资料识别岩性

充分利用遥感资料“多”（multi-）的特点来描述岩性特征、区分岩石类型是遥感地

质学的一个重要内容。多平台、多波谱、多时相遥感资料较之五、六十年代以前单靠黑白航空像片来作解译，提供的信息更多，效果更好。

三、岩性识别的主要方法

(一) 用多波谱遥感资料识别岩性

用航空或卫星多波段遥感资料来识别岩性（蚀变岩及含矿地质体的多波段遥感也属广义岩性识别）是用得最多、最成熟的一种技术方法。彩版Ⅲ-左上是新疆阿尔泰半裸露地区的卫星假彩色合成图像。图像上侵入体、沉积岩层及松散的沉积物的影像特征截然不同极易区分。这是因为在半裸露区内土壤、植被以及人为干扰因素极弱的缘故。

Crowley J.K. (1984) 对美国犹他州康菲森岭的志留、泥盆纪白云岩类多波段航空遥感资料的岩性识别。研究用Bendix24通道航空扫描仪的第4、6、10、12、13波段。目的是为取得① $0.55\mu\text{m}$ 的三价铁的吸收带② $0.6\mu\text{m}$ 及 $1.0\mu\text{m}$ 处把叶绿素在 $0.67\mu\text{m}$ 的反射值强烈上升处与岩石土壤分开，③ $2.2\mu\text{m}$ 则是 CO_3^{2-} 根的吸收带的波段。然后用主组份变换矢量矩阵的 PC_2 （第二主组份，通道6）， PC_3 （第三主组份，通道10）， PC_4 （第四主组份，通道12），分别以红、蓝、绿作假彩色合成图像。与原有地质图件相比（图7-14右图），遥感解译出的①Gt（吉尔梅特组，D₂-3），灰色块状细晶灰岩，②Si（西蒙森组，D₂）浅灰、暗色白云岩互层，③Se（塞维组D₁-2）风化较强的浅灰色细晶白云岩，④Lk（莱克敦组S₃）上部有浅色粗晶灰岩层的致密块状白云岩（图7-14，A）。与原有地质图相比，Lk，Se都可进一步分出层组。但在图幅西南部的划分不佳。断裂与原有资料都有较大改动。

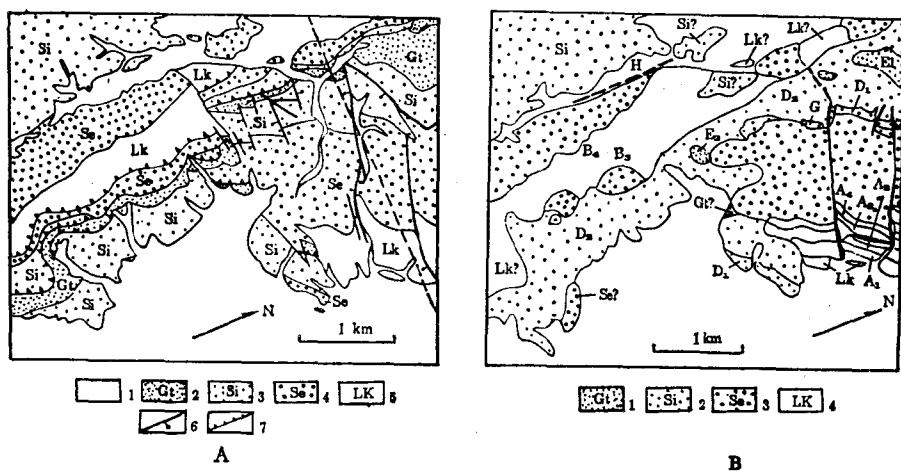


图 7-14 美国犹他州康菲森岭地质图 (A) 及据主成份分析增强资料解译出的影像地质图 (B)

(据Crowley J.K. 1984)

(二) 利用岩石热惯量识别岩性

热惯量是物体（包括地质体）阻止温度变化的热反应的一种量度，单位是卡/厘米²·秒^{1/2}·度。热惯量值大，则地物周日地表温度变化幅度小，反之则温度变化幅度大。表7-3煤层周日变量为47℃，而灰色灰岩为20.2℃。煤层热惯量值小。由于求热惯量的相对大小只需测得岩石的反射率。及地面昼夜温差值（ ΔT ）即可计算出热惯量值。技术方法比

较简便,因而是一种有发展前景的岩性识别方法。河北涿源木吉村一带碳酸盐岩实测热学性质的结果成功地将未蚀变白云岩、硅化白云岩、鲕状灰岩、泥灰岩夹页岩区分开来。如果利用热惯量值作为新图像的象元值,制成热惯量图,用它来区分岩性。这是一种有发展前景的方法,但当前还处在试验应用阶段。表7-6是一些矿物及岩石的热惯量数据(崔承禹, 1992)

表 7-6 三大岩类的热性质

岩石名称	热导率K 卡/厘米·秒·度	密度ρ 克/厘米 ³	热容量c 卡/克·度	热扩散系数 厘米 ² /秒	热惯量P 卡/厘米 ² ·秒 ^{1/2} ·度
石灰岩	0.00913	2.63	0.239	0.01425	0.0765
白云岩	0.01227	2.75	0.274	0.01628	0.0962
粉砂质页岩	0.00741	2.68	0.250	0.01106	0.0705
石英砂岩	0.01430	2.58	0.225	0.02463	0.0911
细粒花岗岩	0.00513	2.69	0.255	0.00748	0.0593
正长斑岩	0.00575	2.54	0.242	0.00938	0.0593
闪长岩	0.00504	2.66	0.199	0.00952	0.0517
安山岩	0.00626	2.76	0.223	0.01017	0.0621
辉长岩*	0.0060	3.0	0.17	0.012	0.055
玄武岩	0.00803	2.78	0.229	0.01261	0.0715
橄辉岩*	0.0110	3.2	0.20	0.017	0.084
水镁石大理岩	0.01121	2.51	0.304	0.01469	0.0925
硬绿泥石片岩	0.00830	2.74	0.232	0.01306	0.0726
蛇纹岩*	0.0063	2.4	0.23	0.013	0.063
石英岩	0.01420	2.57	0.232	0.02382	0.0920
水*	0.0013	1.0	1.01	0.001	0.037

(据崔承禹, 1992; 其中*据Jadza)

(三) 用高光谱分辨力多通道成像波谱仪资料来识别岩性

通过地物波谱来识别岩性常常因为植被、土壤的掩盖,岩石风化与人为破坏、或者岩体岩层出露面积较小等种种因素而增加识别难度。提高图像的光谱分辨力和应用更多通道的成像仪器是克服上述困难的一种技术选择。即用窄波段、多通道、高光谱分辨力的遥感器来获取地物波谱。如美国地球物理环境研究(GER)公司研制64通道机载高光谱分辨率扫描仪(AIS)。其中0.4—1.0μm分为24通道,1.0—2.0μm分7个通道,2.0—2.5μm分32个通道,另一道用储存陀螺仪信息。在6000m高成像时其地面分辨率为12×22m。机载可见光—红外成像波谱仪(AIS-2)划分成高达220个波段,工作范围为0.43—2.42μm,平均波谱分辨力为10nm。这样的遥感资料,使得定量检测单种或多种矿物存在以及编制相应图件成为可能。其原理是:

第一,各种岩性和矿物都有一些可做为标志性的矿物,而这些矿物又都各有自己的波谱特征(表7-7)。图7-15是高岭石、蒙脱石、伊利石和明矾石(它们都与热液蚀变有关的标志性矿物)的波谱曲线。四种矿物的吸收谷都在2.2μm附近,其中高岭石曲线的“肩部”在2.18μm处,明矾石的吸收谷在2.21μm,都落在TM-7波段内。根据石榴子石Fe³⁺离子在0.77—0.87μm处吸收的特征,D.S.Windeler Jr(1993)利用VNIR图像数据,识别出石榴子石-辉石蚀变带来。

第二,利用多通道的机载高光谱分辨力成像波谱仪获得波谱曲线,与某些标志性矿物

表 7-7 波长范围和矿物标记

	波 长 范 围	可辨别的主要矿物
可见-近红外	0.40—1.20 μm	Fe、Mn 和 Ni 的氧化物及稀土矿物，赤铁矿、针铁
	0.55—0.80 μm	矿植被
短波红	1.30—2.50 μm	氢氧化物、碳酸盐和硫酸盐
	1.47—1.82 μm	硫酸盐类——明矾石
	1.47—1.76 μm	硫酸盐类——黄钾铁矾
	2.16—2.24 μm	含 Al-OH 基团矿物 —— 白云母、高岭石 —— 迪开石、叶蜡石 —— 蒙脱石、伊利石
	2.24—2.30 μm	含 Fe-OH 基团矿物 —— 黄钾铁矾、锂皂石
	2.30—2.40 μm	含 Mg-OH 基团矿物 —— 绿泥石、滑石、绿帘石
	2.32—2.26 μm	碳酸盐类——方解石、白云石、菱铁矿
中红外	8.00—14.0 μm	硅酸盐类——石英、长石、辉石 —— 橄榄石

(据薛重生等)

的实验室实测的典型曲线对比，能半定量地确定标志性矿物的存在。由于AIS可以取得多达220个波谱数值，由它测得的波谱曲线更接近实验实测得到的曲线。图7-16是AIS的反射波谱曲线，其波长从2.0—2.3 μm ，波长间隔为0.01nm，共分为30个波段。其取样点的位置见图右侧。从图上方两条波谱曲线与实验室内测得明矾石的波谱曲线相比较，其形态很相似。可知这两处分别是明矾石与高岭石含量较高的地段。

第三，通过某些标志性矿物的检测，来达到找矿和编制分布图的目的。

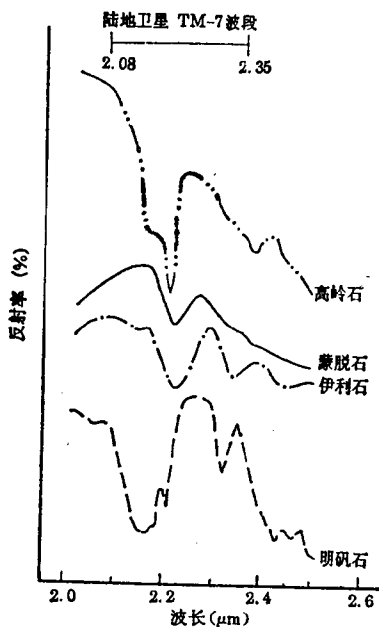


图 7-15 2.0—2.5 μm 大气窗口的实验室波谱曲线
(据F.F.Sabins, 1986)

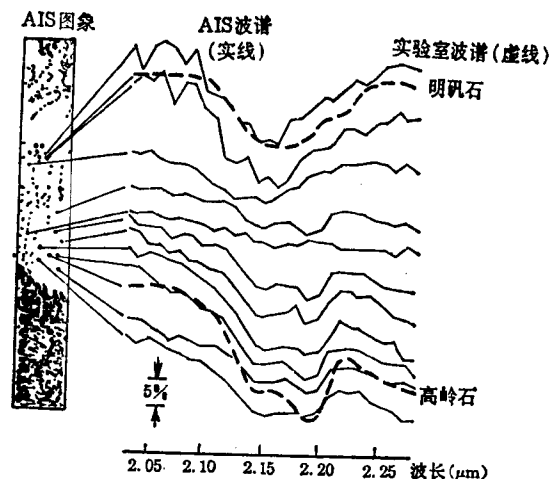


图 7-16 AIS反射波谱曲线
(据F.F.Sabins, 1986)

(四) 用图像的影纹和结构来解译岩性

合成孔径雷达 (SAR) 图像的空间信息非常丰富。空间信息包括 结构 (纹理)、局

部组织及形状三类。影纹（或称影纹图案）是遥感图像上很细小的几何形状。因为不同岩性的抗风化能力不同，发育其内的节理等构造裂缝的优势方向，长度与密度不同，微水系（末级支流、冲沟等）的发育特点也不同。因而产生的影纹图案也不一样。广西等地大片碳酸岩岩溶发育区，其TM、MSS图像上影纹呈核桃状、蠕虫状、花生壳状等。可以根据各种影纹图案不同，通过目视解译来区分岩性。

通过付利叶滤波，根据遥感图像结构进行岩性识别。R.G.Blom 等人（1982）对雷达图像增强处理研究认为岩性（岩类）识别，以付利叶带通滤波较为有用。朱亮璞等人（1991）用付利叶功率谱法（即频谱分析法）对岳阳地区SAR样区进行连续频谱取样分析，得到频谱功率谱曲线和功率分布曲线（图7-17）。通过对曲线的研究分析，认为从曲线中可取得四点地学信息：

①从功率谱角分布曲线的峰值确定能代表坡面、层面、断裂面产状的，产生最大散射的面的方位角，②确定两个散射较强的面的夹角，③推算出样区水系密度，④用功率谱角分布曲线与功率谱曲线两者总的形态特征，可以分析样区的地形基本特征。

（五）用多源地学信息资料识别岩性

利用遥感资料来识别岩性最基本的方法仍然是目视解译。上述五种方法中，以多光谱遥感资料解译岩性比较常用，技术也比较成熟。高光谱分辨力多通道成像波谱仪的应用，实际上是前者的发展，很有发展潜力。方法（三）、（四）则完全处在试验应用的阶段。多源地学信息资料识别岩性，近年来不断取得进展。这部分内容将留在第十章第二节内述明。

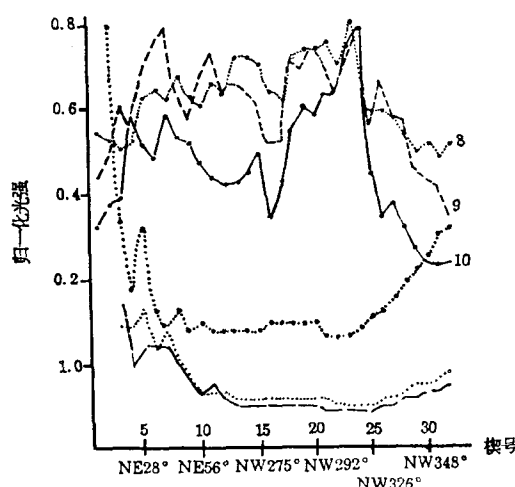


图 7-17 岳阳冷家溪群板岩频谱功率谱角分布曲线
(据朱亮璞)

第五节 遥感地层分析与岩性制图

遥感资料记录下地壳表层各种岩性的波谱与空间信息。在遥感图像上解译出的岩性、岩类和岩性单元是“哑”的，得不到地质年代和地层顺序的资料，这就必须依靠已有地质资料（图件等）和相应地面地质研究，才能进行岩性（或岩类）制图（或编图）。

一、地层角度不整合接触关系的解译

上下两套地层在地质历史上有过沉积间断或地层缺失，两套地层成一定角度相接触是角度不整合的基本概念。遥感图像上能解译出同一岩性-地层单元沿走向展布方向上在不同地段分别与产状不同的其它影像单元相接触。这时如能利用遥感图像宏观而覆盖面积大的长处，排除其为断层接触关系的可能性，需进一步利用遥感图像确认地层角度不整合的存在，可依据下列解译标志：①区域岩性-地层单元产状的标志及其变化。②角度不整合两套地层构造型式，构造发育强度，变质特点等不同。它们在遥感地质上表现为线性构

造优势方向不同和密度不同,褶皱组合形式不同(参阅第七章第二节),变质与未变质等。③地质上的上述差异,必然造成地貌景观分区,水系类型,影纹图案和色调色彩等影像特征的不同。④形成较早的地质体(脉岩、断裂、褶皱、岩体等)被较新的岩性-地层单元所覆盖。

二、岩相变化的遥感分析

根据某个地层影像特征的变化,尤其是当沿走向方向变化明显或有一定规律可循时,配合地质资料,可获取区域地层相变的一些信息,但要很慎重。因为更多情况下,影像特征的变化是自然地理环境或成像条件变化引起的。陆地卫星图像安顺幅,从影像特征上可以看到西部三叠纪为层理较明显的碳酸盐岩,向东很快变为层理不太明显、色调也比较浅的碎屑岩系,中间为一条南北向深灰色的岩堤礁,是相变界线。这是我国比较有名的西南地区三叠系下统飞仙关组地层相变的遥感实例。

最后,要指出的是,基岩区的地层角度不整合接触关系和岩相变化的解译效果不佳,但松散沉积物与基岩的不整合接触关系以及松散沉积物的相变,其解译效果却是远胜于其它任何一种地质方法。从已公开出版的新疆维吾尔自治区及黄淮海平原的卫星图像镶嵌影像图上,沙漠、盐碱地、坡积及河流沉积的空间展布,界线的确定都是地面工作难于办到的。

三、遥感地质图件的编(测)制

(一)概述

国内外都在试点应用各种遥感资料,以下列几种形式来解译编制和填绘地质图件:①通过典型样区和地质解译划分出各种岩性单元(图11-5)而不涉及岩性单元的时代归属。②利用遥感资料解译出不同的岩性-地层单元,编制或修改地质图件、对解译出的不同岩性或岩类赋予一定地层学的涵义(图10-6)。它与区域地层有一定对应关系,但并不对等。③划分岩性-地层单元并赋予区域地层学的涵义,作为区域地质制图的填图单位。

地矿部1991年发布的1:5万区域地质调查总则规定,沉积岩区采用多重地层单位划分,岩石地层方法填图;侵入岩采用岩石谱系单位的方法填图;火山岩采用火山地层-岩性(岩相)双重方法填图;变质岩采用构造-地(岩)层或构造-岩石法填图。可见三大岩类发育区填图时,都把岩性作为填图单元划分的一个依据,但总的说来,一个面积较大的地区内,据影像特征划出的较大的岩性-地层单元与根据生物地层学划分出的地层填图单位。多数情况下两者对应得较好。但当岩性相近,地质时代不同的两组地层相邻产出时,(尤其岩层厚度不大,构造复杂地区),其影像特征必然十分相似而难于分开。因此,遥感资料应用到区域地质调查上确有一些技术上的难题要解决。为解决这个矛盾,前苏联1:5万区域地质调查在采用常用地质填图方法的同时,全苏航空遥感托拉斯却以遥感方法为主,对大部分1:5万幅进行了超前期遥感地质解译,实行双轨制(陈昌礼,1991)。

(二)岩性-地层制图步骤

1.准备阶段。收集各种地质的、遥感的及物化探资料,进行图像预处理和概略地质解译。在了解全区遥感地质特征概况的同时,重点评价影像地层单位可分程度,初步归纳各种地质体的解译标志,选定实测剖面的位置等。

2. 野外踏勘及建立遥感岩性-地层单位的阶段。通过实测地层剖面及剖面上各主要岩性地物波谱数据, 通过野外踏勘, 进一步完善对各种地质体解译标志的基础上, 建立遥感岩性-地层单位。此阶段也包括必要的室内图像处理。

3. 解译、野外验证及图件测制阶段。此阶段基本完成全区测量及编制各种图件工作。

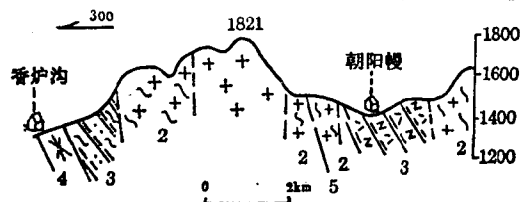


图 7-18 伏牛山混合花岗岩龙池慢

地形地质剖面图

(据张天仪)

1. 混合花岗岩, 2. 均质混合岩, 3. 混合片麻岩,
4. 荣川断裂, 5. 烧入场断裂

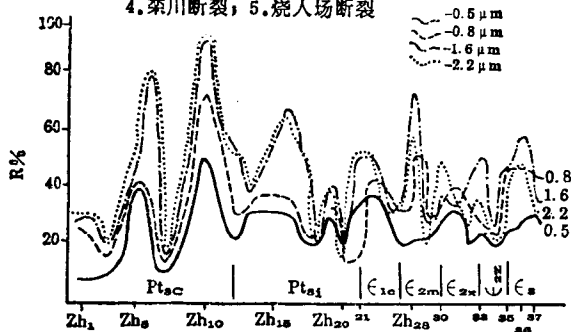


图 7-19 黄院反射波谱剖面

(据薛重生等, 1989)

Pt3c. 长龙山组变质石英砂岩夹粉砂质板岩;

Pt3j. 景儿峪组大理岩夹钙质板岩;

ε_{1c}. 昌平组厚层结晶灰岩; ε_{1m}. 馒头~毛

庄组泥质板岩及准片岩; ε_{1x}. 徐庄组粉

砂质板岩夹结晶灰岩; ε_{1z}. 张夏组中厚层鲕

状白云质大理岩; ε₁. 纹带状泥质、白云质大理岩

局部地质构造, 作为影像地层单位的划分标志。其选择标准是: ①其上下岩层的色调/色彩反差明显, 延续性好。②上下岩层的地形地貌差异显著, 沿解译标志层出现陡崖、陡坎、凹谷、坡折线、岩层三角面等微地貌。③其所在层位最好处于某个地层界线附近。如京郊寒武系底部府君山组巨厚层的深灰色白云岩、它常常构成陡崖及深色调, 又刚好是与上元古代青白口系昌平灰岩的分界处。又如区域变质岩填图时大理岩的夹层也是常用的影像标志层。

3. 影像地层剖面的编制

通过航片立体像对连续观察, 编绘出影像地层剖面, 以便把全区的地质、岩石单元的界线和接触关系, 影像识别标志(地貌和地形)综合表示出来(图7-18)。

4. 岩性-地层反射波谱剖面的测制

4. 综合解译成图和遥感地质专题研究阶段。

5. 总结、成图阶段。

(三) 遥感地质图件编(测)制的几种主要工作

在执行上述各个工作步骤中, 根据对1:5万区域地质调查中用遥感图像识别岩性的试验研究, 有下面几项主要工作内容:

1. 影像地层单位可分程度的评价

对工作区内影像地层单位可分程度按四级标准来区分: ①良好。即岩性单元或地层划分可达实际填图单元(与同比例尺区域地质调查规划的要求相比较)的80%以上, 各种填图单元解译界线精确度达75%以上。②较好。在无环境因素干扰的情况下, 可解率达80%以上, 但局部地段较差。③中等。地层划分率低于65%, 解译的界线有一定的误差。④差或极差。大多数地层界线难于确定。可分程度低的要加强地面地质工作。地面观测点及线就要相应加密。

2. 影像标志层的选择

影像标志层的作用是: 用它来追索岩层。岩层在遥感图像上的空间延伸, 揭示

在条件许可的情况下，可以测制区内主要岩性-地层单位的多波段反射波谱剖面（图7-19）。其目的是：①为岩性识别的图像增强处理提供依据。②为从反射波谱特征的角度，来评价工作地区各主要岩性-地层单元可分程度作出判断。③是为影像标志层选择和影像地层剖面制作作参考用。必须指出的是，由于干扰因素很多，技术难度也大，其实效并不理想。

第八章 遥感构造解译与编图

构造解译主要是在遥感图像上识别、标绘和分析各种构造成份的存在标志、形态特征、分布规律、组合和交切关系及其地质成因。构造解译的具体内容有：①解译各种构造形迹的形态特征和尺度；②判别各种构造形迹的性质和类型，量测构造要素的产状；③编制构造解译图；④分析各种构造形迹的空间展布及组合规律，总结区域构造特征。为完成上述工作，有时解译工作者还要根据工作区的自然地理、地质条件，正确选择遥感资料和图像增强处理的方法及方案。

解译基本原则是：①结合所研究构造形迹的规模，收集相应比例尺的遥感资料；②多时相、多波段、不同种类的遥感资料的对比分析；③应用各种地学资料进行综合分析；④遵循构造地质学的原理和基本理论。从构造总体轮廓、区域构造格架入手，分析具有代表性的单个构造，或者分区、分构造层进行解译研究，最后分析各种构造形迹间的组合关系和分布规律，总结区域构造特征。

第一节 岩层产状解译

一、不同产状的岩层图像特征

（一）水平岩层

倾角小于 5° 的岩层是水平岩层或近水平岩层，它们在遥感图像上呈现某些特有的影像和地形地貌特征。在平坦地区，由于地形剥蚀，切割轻微，地表通常只出露最上部的层系，因而在遥感图像上的色调、水系、影纹等影像特征都显得单一而均匀；在地形遭受强烈切割的地区，下伏岩层被揭露，较新的岩层分布在山顶或分水岭上，而较老岩层出露于河谷、冲沟等低洼处，在遥感图像上表现为不同色调或微地貌条带围绕山体或山梁呈封闭的同心环状、贝壳状、花边状等影纹图案（图版43）。差异风化结果，形成阶梯状地形，方山、桌状山、平顶山发育，深切的河谷，形成千沟万壑的地貌景观。

水平岩层的影像特征有时与人工梯田或经剥蚀的褶皱构造的影像特征相似，解译时应注意区别。

（二）直立岩层

是倾角大于 80° 的直立或近于直立的岩层，遥感图像上的特征是不同色调或微地貌组成平行的直线状或弧线状条带，这些条带不受地形起伏的影响，可以穿越沟谷、山系，沿着它自身的走向延伸（图版44）。坚硬的直立岩层常形成两坡对称的平直的山脊或脊垅状地形，而软弱岩层则形成平直的槽沟洼地，两者组合成“肋状”地形。直立岩层可以直接根据其出露宽度确定其厚度。

（三）倾斜岩层与单斜构造

倾角在 5° — 80° 之间的岩层，为倾斜岩层，它是最常见的岩层形态。由于产状、地形切割程度不同，可以形成各种复杂的图形特征。在地势平坦地区，因未受侵蚀切割或切割

很微弱, 倾斜岩层在遥感图像上表现出与直立岩层相似的影像特征。很难判断它的倾向和倾角; 在地表遭受强烈切割的地区, 倾斜岩层在遥感图像上表现为由不同色调或微地貌条带组成的一系列平行折线状、锯齿状、弧线状等影像特征(图版45)。

单斜构造是指在一个地区内向同一方向倾斜, 倾角也大致相同的一套倾斜岩层, 根据其倾角陡缓和坚硬程度不同, 倾斜岩层常常形成单面山、猪背岭等地形。缓倾斜或中等倾斜的坚硬岩层常顺着地形的坡向裸露在山坡表面上形成单面山地形, 单面山地形发育区在遥感图像上可以看到山脊互相平行且延伸很远, 两侧不对称山脊, 顺岩层的倾斜方向形成缓坡是顺向坡, 与岩层倾向相反的方向形成陡坡, 称逆向坡。单面山地区的河流常沿岩层走向发育, 河流两侧的支流或冲沟的发育程度有明显差别, (图8-1)。顺向坡上支流长而稀疏, 次级冲沟较少, 而逆向坡上支流短而密, 且沿着岩层层理方向发育有密集的次级冲沟。

当陡倾的单斜岩层软硬相间且软岩层厚度较大时, 能形成假单面山地形, 即硬岩层组成山脊和陡而窄的顺向坡, 软岩层组成宽而缓的逆向坡。此外, 在陡倾斜岩层区, 中等角度和低角度的断层面受侵蚀切割后亦很像平缓的倾向坡。因此, 在褶皱强烈和断层发育的地区, 利用单面山地形判断岩层产状时应注意区别真假顺向坡, 以免造成错误(参阅第五章最后一节)。

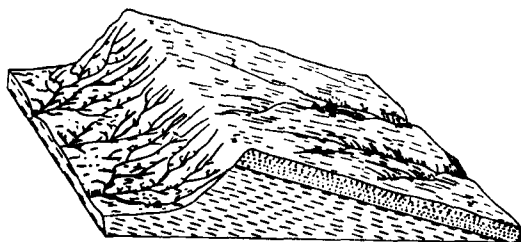


图 8-1 倾斜岩层顺向坡及逆向坡上水系的差异

(据C.F. Miller, 1961)

二、岩层产状的测定方法

遥感图像上岩层及其它构造面产状测定, 就是从影像特征来定性或半定量确定其走向、倾向和倾角。

(一) 岩层三角面的图像特征

1. 岩层三角面

岩层三角面是指在遥感图像上同一倾斜岩层地表露头线上的最高点(山脊点)和与之相邻的两个最低点①(河谷点)相结而成的一个假想三角形平面。岩层三角面是岩层风化剥蚀出露的实体上三点连结成的面, 所以这个三角面的产状可代表岩层的产状, 它是在遥感图像上判断岩层产状要素的最佳标志。它的形态受岩性和地形侵蚀形态的影响, 遥感图像上可以是三角形、熨斗形、半圆形、半月形、梯形等形状, 多个岩层三角面常沿岩层倾向形成叠瓦状影像, 沿岩层走向断续相连形成锯齿状、波浪状或不规则的折线状(图版45)。与倾斜岩层的层面一样, 任何倾斜的构造面(包括断层面、节理面、不整合面等)在地表遭受切割后都会构成“三角面”(或“V”字形影像)。

2. 中心投影成像引起岩层三角面的畸变

由于航空像片属中心投影, 因此它出现在像片不同部位时, 其形态会产生畸变, 如图8-2所示, 地面上一组向西倾斜, 倾角都是 60° 的单斜岩层, 在图像上形成一系列形态与大小不同的三角面。在像主点右侧的三角面显示岩层的西倾, 但随着与像主点距离的增大三角面尖端愈来愈尖锐, 造成岩层变缓的假象(图8-2中1—5); 而在像主点左侧(图8-2中6—8)三角面亦指示岩层向西倾斜, 但随着它与像主点距离的增大, 三角面的尖端愈来愈钝, 造成岩层越来越陡的假象; 当摄影投射角与岩层倾角相等时(图8-2中9), 岩层三角

①也可以是任意不等高的三点

面在像片上的投影变为一条直线，造成岩层直立的假象；而在摄影投射角小于岩层倾角的部位（图8-2中10，11），岩层三角面尖端指向改变，图像上指示岩层向东倾，造成岩层倒转的假象。因此，在利用岩层三角面确定岩层产状时，应尽量选择在像主点附近的三角面来作产状解译，而不能选择像片边缘处的三角面。

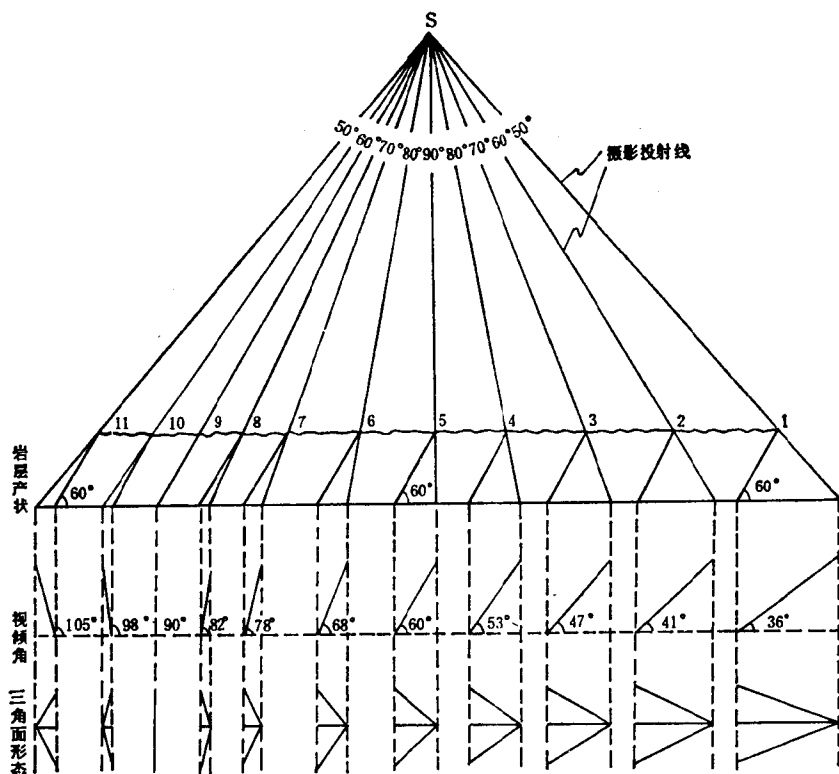


图 8-2 航空像片上岩层视倾角和岩层三角面形态的变化规律

（据 M. H. 彼德鲁谢维奇，1961）

（二）岩层走向和倾向的确定

在分析构造时，必须在充分考虑岩层分布，露头形态以及它们与地形和影像的相互关系的基础上，来估测岩层的走向和倾向。在地势平坦地区，倾斜岩层出露地表的地质界线就是岩层走向线，直线状地层条带的延伸方向就是地层走向。在地形起伏较大的地区，倾斜岩层的露头线变成折线状的条带影像。这时可沿着河谷的相对两岸、窄分水岭的两边或者两个平行的沟谷谷坡上的岩层露头，选择同一岩层层面上高程相等的两个点，其连线即为岩层的走向线，向岩层倾斜方向作走向线的垂线，即得到岩层倾向线；然向利用地形图或通过图像经纬线确定像片上的真北方向，测量出走向线和倾向线的方位角。

当沟谷与岩层走向近于垂直时，根据构造地质学中的“V”字形法则来判断岩层倾向应当慎重。

（三）岩层倾角的测定方法

测定岩层倾角大小的测定方法有多种，下面介绍两种常用的方法：

1. 目估法

可以依据遥感图像上岩层三角面的形态特征目估岩层产状。在其它条件相似的情况

下, 岩层三角面的高 (即三角面顶点到底边垂线的长度) 愈长, 岩层倾角愈小 (图8-3)。也可以据岩层三角面顶角的大小来判别, 岩层倾角较小时, 其顶角也较小。目估法只能定性地判定岩层倾向及倾角大小。通常把水平岩层、缓、中等及陡倾斜及近直立岩层的倾角定为 $<5^\circ$ 、 $5^\circ-20^\circ$ 、 $20^\circ-45^\circ$ 、 $45^\circ-80^\circ$ 、 $>80^\circ$ 。利用航空像片目估产状时要尽量选用在图像中心处的岩层三角面, 以减小中心投影产生的误差。

2. 立体模型测量法

这种方法需用航空像片立体像对。首先在立体镜下观察出立体模型, 从像片中心 (即靠近像主点附近) 露头良好地段选定一个岩层三角面, 然后用一小三角板 (硬纸板) 贴着立体模型中所测量的岩层三角面逐渐变化三角板的倾角, 直到确认小三角板很准确地模拟出所测岩层三角面的产状时为止。然后用量角器测量小三角板与像平面间的夹角, 即为该岩层三角面的视倾角。由于立体镜下的光学立体模型在垂直方向上有夸大, 所以量得的视倾角要经换算才是真倾角。换算首先要知道垂直夸大系数 K , 它是一个立体模型垂直比例尺与水平比例尺的比值, 取决于航摄仪系统和立体观察系统的几何关系, 主要与两摄影基站的距离 B , 立体观察用的两张像

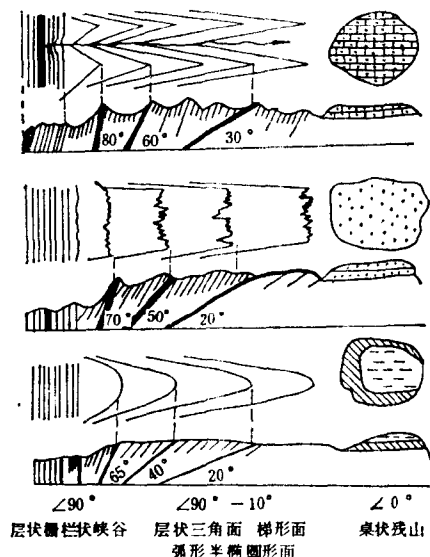


图 8-3 用岩层三角面的影像特征判别岩层倾角
(据朱亮瑛等, 1981)

片相对定位后像主点之间的间距 S 、航摄仪焦距 f 、航高 H 等多种因素有关。室内解译时, 可采用 M. H. 彼得鲁谢维奇等人推荐的下列经验公式:

$$K = 3.85 \frac{B}{H} \quad \text{或} \quad K = 3.85 \frac{S}{f}$$

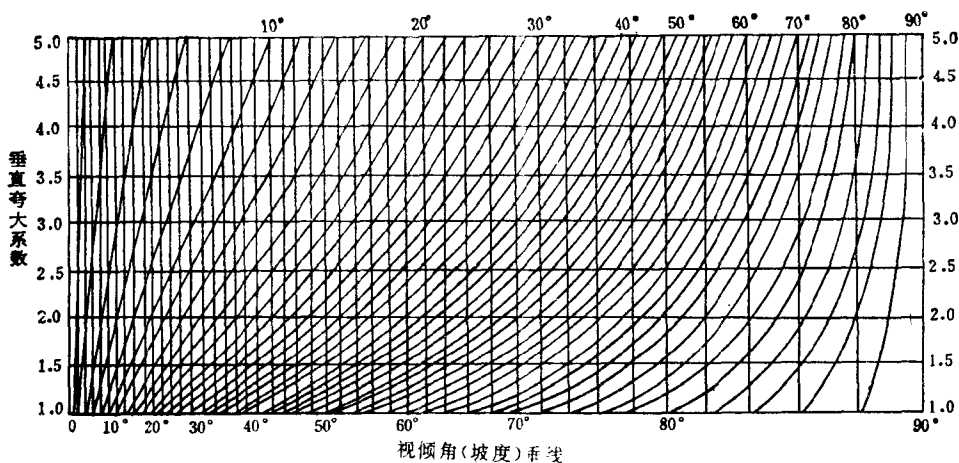


图 8-4 真倾角、视倾角及垂直夸大系数的关系
(据朱亮瑛等, 1981)

垂直夸大系数 K 一般为2.5—3.5。图8-4为一种将视倾角换算成真倾角的图表，其横坐标为视倾角，纵坐标为垂直夸大系数，曲线为真倾角。假设垂直夸大系数为3.0，视倾角为 70° ，则沿横坐标 70° 线上向上直至纵坐标为3.0处，得一交点，顺曲线方向向上至上边标有真倾角数处所指示的 42° ，就是换算后的真倾角。

上述测量岩层产状要素的方法，同样适用于在遥感图像上求其它地质构造面（如断层面、节理面、不整合面等）和岩脉、矿脉等的产状要素。

岩层产状要素的解译是大量的、非常重要的基础性解译。它是构造与岩性识别与编图的基础。由于岩性、地形及成像方式的不同，岩层和岩层三角面在遥感图像上影像特征会有很多变化，作产状（尤其是倾向）解译时要慎重和充分应用地质知识和解译技巧。

第二节 褶皱构造解译

在遥感图像上研究褶皱构造可以充分利用遥感图像的宏观、概略的特点，首先在小比例尺图像或镶嵌图上作总体观察，识别褶皱构造的总体轮廓，然后在适当的部位选择较大比例尺像片进行立体观察，进行褶皱要素的解译和测量，从而分析褶皱的类型、性质，最后结合大、中、小比例尺图像的综合解译分析，研究褶皱与其它构造的关系。褶皱构造解译的基本任务是：①确定褶皱构造的存在；②分析褶皱构造的形态和类型；③研究褶皱的内部构造及褶皱的组合形态特征；④研究褶皱构造与其它构造的关系并分析褶皱构造的形成机制。

一、褶皱构造的解译标志

（一）图形标志

由于不同岩性风化后产生色彩、地形地貌、含水性、植被类型和疏密等差异，在遥感图像上表现为地形及色调（色彩）上的条带状影像呈圈闭的或半圈闭的圆形、椭圆形、长条形并具明显对称性的图形（图版53）。图版46是美国加州佩里亚县伊姆勒公路背斜的夜间热红外图像，其上褶皱核部是深色调的“冷”岩层（粉砂岩），“冷”岩层与“热”岩层（砂岩）在图像上的深浅色调条带交替变化组成的“U”形图案勾绘出褶皱两翼的形态。由于该区岩性差别不大且没有与褶皱构造相联系的明显的地貌特征，因此，该褶皱在普通黑白航片上没有显示。

（二）构造地貌对称性分布

岩层三角面、单面山、猪背岭等构造地貌沿某一界面对称性重复出现是判断褶皱存在的重要标志。

（三）影像相同或相近的岩层对称重复出现

图像上岩层的对称重复主要表现为不同色调（色彩）的条带呈对称重复分布。当岩层厚度较大或岩层间岩性差异明显时，反映为不同的微地貌组合、不同的植被、土壤条带及不同的水系、花纹的对称重复出现（图版65）。

（四）转折端标志的确认

当发现遥感图像上带状弯曲影像特征的岩层，同时具有岩层三角面的产状有规律地偏转，构成马蹄形、弧形等几何形态（图版47），这是褶皱转折端的影像特征。转折端在遥

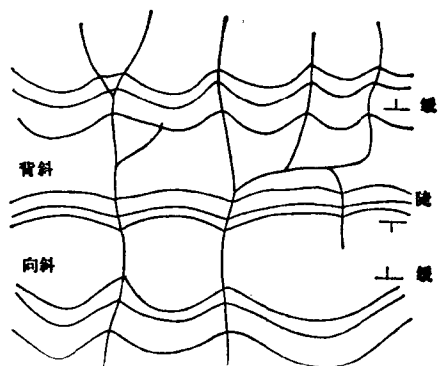


图 8-5 正常背斜、向斜的三角面形态
及岩层条带弯曲形态
(据李冬田等, 1988)

一般正常褶皱的两翼往往有对称或相似的水系型式。放射状、向心状、环形水系(图5-4)是褶皱较为常见水系类型。

感图像上都显示为一坡陡、一坡缓的弧形山脊的影像特征。缓坡向外的可能为背斜的外倾转折;缓坡向内的可能为向斜的内倾转折。转折端标志的确认,是从遥感图像上判明褶皱存在的重要标志,而内、外转折端的确认,主要标志是产状(倾向)的解译。

(五) 水系标志

褶皱两翼的大河流通常沿着两坚硬岩层间的软弱岩层平行于岩层走向流动,支流则顺着顺向坡及逆向坡流下,支流的相对长度、疏密程度及类型为推断岩层的倾斜方向提供了线索。褶皱转折端可能由主流的弯曲绕行及撒开状或收敛状的水系型式反映出来。一

二、褶皱构造地质特征的遥感分析

(一) 确定背斜与向斜构造的遥感标志

在遥感图像上判断背斜与向斜构造的解译标志主要如下:

1. 岩层三角面的产状标志

背斜构造两翼岩层三角面尖端指向相对,两翼单面山顺向坡向外倾,顺向坡水系向外流且对称分布;向斜构造两翼岩层三角面尖端指向相背,两翼单面山顺向坡朝里倾,顺向坡水系向内流且对称分布。

2. 转折端标志

背斜构造具有外倾转折端及撒开状水系,河流在通过背斜转折端时多呈绕行的弧形弯曲形态;向斜构造具有内倾转折端及收敛状水系。

3. 横切褶皱轴的河谷地带的地层条纹条带的形态标志

当河流横切背斜构造核部时,岩层条带呈纺锤形;当河流横切向斜构造核部时,岩层条带呈哑铃形(图8-5)。

4. 褶皱内部节理、裂隙的组合模式的标志

背斜构造核部多形成纵向或横向张节理,翼部形成扭性节理(“X”节理);向斜构造核部发育扭性节理、翼部发育横张节理。

(二) 褶皱横剖面形态类型的遥感分析

在遥感图像上通过影像特征分析两翼岩层的产状及两翼同一岩层单元条带出露宽度的变化可以推断褶皱的紧闭程度及褶皱轴面的产状,从而确定褶皱的形态类型。一般,在遥感图像上如果褶皱两翼地形切割大致相同,则岩层单元露头的宽度与岩层的厚度成正比,与褶皱两翼的倾角成反比。正常褶皱和倒转褶皱的解译标志如下:

1. 正常褶皱

指两翼岩层向相反方向倾斜的褶皱，包括直立褶皱和斜歪褶皱。正常褶皱的影像特征是沿褶皱轴线对称分布的岩层三角面山脊点尖端指向和倾向坡坡向相对或相背。直立褶皱，其两翼岩层三角面的形态相同或相似，同一岩层单元在褶皱两翼的出露宽度也大致相同（图8-6a及图版52）；轴面倾斜的斜歪褶皱，其两翼岩层三角面的形态明显不同，一翼缓，一翼陡。产状平缓的翼，岩层三角面尖而长，陡翼上岩层三角面宽而短，直立翼则完全无岩层三角面而表现为直线状影像。斜歪褶皱两翼同一岩层单元出露宽度不同，陡翼窄、缓翼宽（图8-6c）。

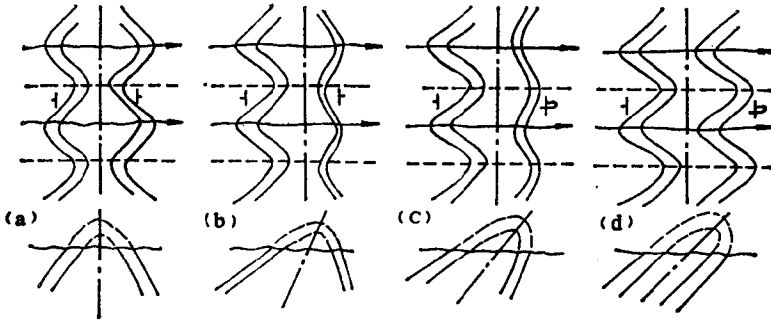


图 8-6 褶皱（背斜）横剖面形态类型
(据易显志, 1989)

上图表示影像上岩层三角面的特征，其中虚线表示山脊线；下图为推断的横剖面形态，
(a) 直立褶皱，(b) 斜歪褶皱，(c) 倒转褶皱，(d) 同斜褶皱

2. 倒转褶皱

倒转褶皱两翼岩层向同一方向倾斜，图像上两翼岩层三角面尖端及单面山的顺向坡指向同一方向。不对称的倒转褶皱可根据褶皱两翼岩层出露宽度和岩层三角面形态的差异判断（图8-6c）；同斜褶皱（图8-6d）其两翼岩层三角面不仅尖端指向一致，而且形态也一致，且同一岩层单元在两翼的出露宽度也大致相同。同斜褶皱很容易误判为单斜构造，应用遥感图像来判定倒转，同斜褶皱的存在，是十分困难和多解的。这时要充分利用遥感图像视域广阔的特点，沿影像标志追索，利用转折端和岩层影像的对称重复出现来确定倒转褶皱的存在。

（三）遥感图像上褶皱构造组合特征

一个地区的褶皱大都不是孤立产出，而是反映区域构造特点的各种组合型式，相互之间存在着密切的成因联系。利用小比例尺遥感图像来分析和对比不同地区褶皱构造的组合形态特征，这是常规地质调查工作难于进行的。根据褶皱群体在遥感图像上的影像特征，褶皱组合形态可分为以下几种类型：

1. 紧密型褶皱组合（图 8-7a）

紧密型褶皱在遥感图像上表现为有规律重复出现的紧密条带状图案，它们由一系列互相平行、定向排列、延伸很长而又呈紧密的线状褶皱及复式褶皱组成。这些褶皱翼部产状很陡，甚至直立或倒转，其转折端多呈尖棱状，有时出现分支褶皱。紧密型褶皱在地貌上常表现为大致平行的长条状水系，水系为严格受构造控制的平行水系，组成高山深谷地貌（图版51）。如我国秦岭、大巴山褶皱带，贺兰山、横断山褶皱带都是比较典型的紧密型褶皱带。紧密型褶皱反映区域上受强烈水平挤压的构造活动地带，如地槽褶皱带、会聚型

板块缝合带等。

2. 宽展型褶皱组合 (图 8-7b)

宽展型褶皱在图像上表现为疏密相间的平行条带状图案。它们是由一系列平行的发育程度和形态特征明显不同的背斜和向斜相间排列组合而成。宽展型褶皱按其剖面形态可分为隔档式与隔槽式两种类型。隔档式褶皱的图形是挤压紧密的线状背斜与开阔平缓的向斜相间排列(图版52);隔槽式褶皱的图形是挤压紧密的线状向斜与开阔的背斜相间排列。宽展型褶皱在地貌上常常表现为一组大致平行的直线状山脊,山体之间距离较大,地势相对平缓,多数情况下表现为顺地形(背斜山、向斜谷)。宽展型褶皱的水系也多受构造控制,主流基本平行于褶皱轴方向。宽展型褶皱的成因与沉积盖层顺基底滑脱面剪切滑动或与基底断块活动有关。如我国四川盆地东部,贵州、广西等地的古生界和中生界盖层中常发育这类褶皱(图 8-7)。

3. 平缓型褶皱组合 (8-7c)

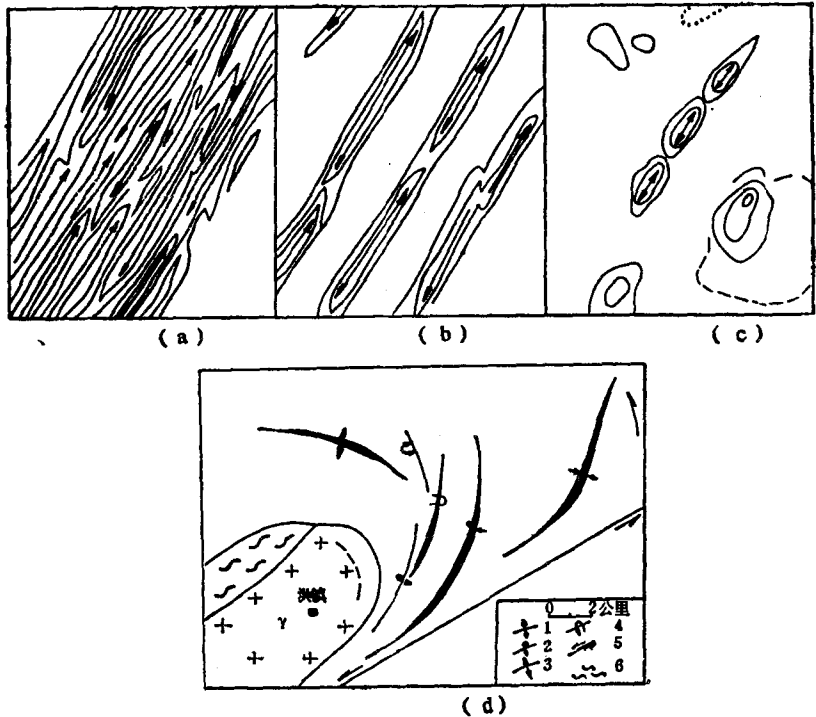


图 8-7 褶皱组合形态
(据朱亮瑛等补充, 1981)

平缓型褶皱在遥感图像上表现为单个出现或零散分布的椭圆形、同心圆形等环带状影像(图版53)。平缓型褶皱有短轴背向斜、穹窿和构造盆地等。短轴背、向斜的图形为椭圆形,短轴背斜的地貌表现多为长条形高地,有时一系列呈平行斜列的短轴背斜或向斜沿一定方向组成雁列式褶皱;穹窿和构造盆地多呈圆形的同心环状图形,穹窿在地貌上常形成缓缓隆起的孤立高地,其上发育放射状水系,穿越穹窿的河流多呈深切的河曲。构造盆地在地貌上常为盆状负地形,发育向心状水系。平缓型褶皱多发育在构造活动较弱的地台区。

4. 弯转型褶皱组合 (图 8-7d)

包括帚状褶皱、弧形褶皱、“S”型褶皱等。它们在遥感图像上形成特殊的组合图形，其特点是平面上都具有明显的弯转形态，一般规模不大，多发育在刚性地块周围或大的扭动构造两侧，系受压扭或扭应力场作用所致。

(四) 叠加褶皱构造的遥感分析

识别叠加褶皱的主要途径是追踪影像标志层，分析早期褶皱轴线的变形特征，研究分析复杂的影纹图形特征。在高级变质岩区主要靠辨认呈断续分布的细线纹所代表的面理和线理的变形、弯曲、有规律交切等特征来识别叠加褶皱。叠加褶皱的图形特征多种多样，但最常见的有以下三种：

1. 穹窿-盆地型式

第一期轴向近水平的一组正常背、向斜与第二期轴向近水平的正常背、向斜大角度相交时，形成“横跨褶皱”。这时，第二期褶皱运动使第一期褶皱枢纽强烈起伏，在两期背形褶皱叠加处形成穹状构造，而在两期向斜褶皱叠加处形成盆状构造。图版54是邵阳幅陆地卫星图像，该区中部为一轴向近东西的早期背斜，核部由震旦系组成，在叠加了后期轴向北东的褶皱后，形成多个轴向近北东的穹窿构造，而后期北东向褶皱的枢纽在靠近基底背斜时一致向上仰起，明显受基底褶皱的控制。

2. 钩状褶皱型式

早期褶皱的两翼岩层和褶皱轴面作为一个褶皱层再次被弯曲，出现两个转折端，形成钩状褶皱，这种叠加作用常发育在大型剪切带旁侧，在变质岩区这种钩状褶皱常与大型韧性剪切带有关。图版47是一个发育在东西向扭性断裂旁侧的钩状褶皱。

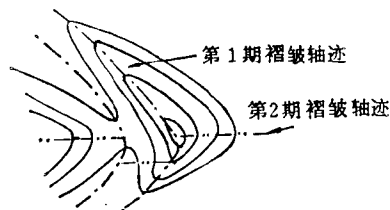


图 8-8 叠加褶皱的新月型-蘑菇状干涉图形
(据J.G.Ramsay, 1987)

3. 新月型-蘑菇状褶皱型式

当第一期的等斜或平卧褶皱被第二期与之轴向呈大角度相交的背斜或向斜叠加时，由于后期剥蚀深度的不同，在遥感图像上可以看到从新月型到蘑菇型的图形样式(图8-8及图版48)。这种叠加褶皱型式在平卧褶皱推覆体受到两次褶皱变形的地区及高级变质岩区非常普遍。

第三节 断裂与线性构造解译

在遥感图像的地质解译中，断裂与线性构造的解译效果最好。应用遥感图像解译断裂与线性构造常常比常规野外工作更有效，因为，大的断裂构造的地面迹象可能是隐蔽的，很少能直接见到断层面的露头。此外，与隐伏和深部断裂有关系的植被、土壤含水量及地表结构的变化很难在地面近距离观察中识别出来，但通过遥感图像的概括作用，使这些个别的、分散的迹象与线性构造联系起来，从而有助于识别出那些地面工作中不易发现或遗漏的断裂构造，有效地弥补地面地质工作的不足，提高了地质工作的精度。

一、遥感图像上的断裂与线性构造

在遥感地质应用中线性构造作为一种重要的地质构造形迹，一直受到解译人员的重

视,关于它的涵义和译名目前使用比较混乱,文献上也不统一。为了使用方便,本书采用线状形迹和线状构造两个术语。

(一) 线状形迹 (Linear features)

线状形迹是指在遥感图像上由色调或地形地物所显示的沿空间某一方向有规律地展布的直线状或微弯曲的线状影像特征。它是一个只考虑几何形态而不具成因意义的术语,能够在遥感图像上构成线状形迹的地表因素有:①地质构造现象,如断裂、节理、区域性构造裂隙、岩层层理、片理、不整合线、岩脉,不同岩性的接触线等;②自然的地形地物,如直线曲线状的山脊、沟谷、河流,平直的湖泊、海岸线,定向延伸的沙垅、沙梁,不同地貌单元的直线状边界等;③人类工程,如运河、灌渠、铁路、公路、堤坝、输油管道、防护林等。

(二) 线性构造 (Lineament, 线性体)

线性构造是指在各种遥感图像上,被认为与地质作用有关的直线、弧线、折线状的线性(状)影像特征。强调的是其成因与地质作用有关,而不是专指构造。线性构造包括:①各种直线状或微弯的弧线状的地质界线。如岩性界线、岩相界线、不整合界线、侵入体接触界线及岩层层理线、片理线、片麻理线、岩脉、矿脉等。②断裂构造成因的线性构造。包括有明显断裂位移的断层、断层带,无明显断裂位移的破裂(节理、劈理、构造裂隙和构造破碎带),以及大型的地壳断裂、深大断裂、隐伏断裂等。③线状应变带。一些曲线状排列的微地貌或线状色调异常反映出的线状形迹,经地面调查既非断层构造亦非破裂带,而是地壳在构造应力作用下的塑性变形阶段甚至是岩石矿物仅发生初期显微变形阶段的反映,称之为线性应变带。④由地形、影纹结构或色调的线状变化反映出来的,暂时无法确认其具体地质成因的线性形迹。

综上所述,我们对断层、断裂、线性构造的解译应当有一个逐步深化的过程。即把那些在遥感图像上以各种影像特征显示出来的线性形迹,经解译认为它的存在与地质作用有关时,就可统称为线性(状)构造。如果能找到某些断裂的影像标志和地质证据时,它就称为断裂或断层。当能确定其产状、力学性质的有关证据时,就可以给予具体命名,如某某正断层、某某左行压扭性正断层、某某韧性剪切带等。

二、断裂、线性构造的解译标志

(一) 断裂、线性构造的直接解译标志

断裂构造的直接解译标志,实际上就是显示在遥感图像上的断裂的某些地质证据。主要有如下几种:

1. 岩性地层标志

岩性、地层影像标志被切割和错开(图版55,图版67),地层重复或缺失。

2. 构造标志

①地质构造的不连续,即构造形迹沿某一界面中断或突变,如界面两侧岩层走向线斜交,断裂、褶皱沿走向被错移(图版46),褶皱沿走向突然变宽或变窄以及界面两侧构造发育程度、构造格局明显不同等(构造的不连续也是不整合及侵入接触的特征,应注意区分)。②构造破碎带的直接出露。规模大的断裂带形成构造破碎带,它们在图像上表现为忽宽忽窄、时隐时现、断续延伸的线状影像特征。由于水理性质不同(贫水或富水)而呈

深或较浅色调。断裂破碎带内常见会出现透镜状构造挤压体(图版56)、构造岩块、平行、雁列或共轭的劈理或节理密集带及局部其它低级或派生构造,这些都是断裂解译的重要标志。

(二) 断裂、线性构造的间接解译标志

这类标志实际上是通过相关分析,可以作为断裂、线性构造存在的标志,如色调、地貌、水系等线状排列或线性异常等。这类标志是多解的,应用这些标志时,地质、物探资料的应用,对各种解译成果的对比与综合分析就显得非常重要。循序解译,注意解译技巧的运用就是非常必要的了。主要的间接解译标志如下:

1. 色调标志

线性构造界面两侧地质体的波谱响应特征存在着差异或线性构造本身有独特的波谱响应特征,因此,在遥感图像上常沿线性构造走向出现明显的与背景色调(色彩)有显著差异的色调异常线、色调异常带及色调异常分界面。

在热红外图像上断层带和裂隙带表现为明显的色调异常线(带),这是由于断裂破碎带或沿断裂带上分布的松散沉积物中含水量的集中,影响了地面辐射温度的变化而在热红外图像上产生明显的色调异常;在干旱和潜水面埋藏较浅的地区,破碎带易风化而构成线状负地形,在SAR图像上形成阴影,非常明显。又如破碎带由于富水(或贫水),以及植被发育不同,或破碎蚀变而有较高的介电常数值,在SAR图像上产生深(或浅)的色调异常线(或带)(图版49);较大的断裂或断裂带在遥感图像上常表现为一定宽度的色调异常条带,条带的宽度各处有变化,有时内部还可以细分出不同的色调异常线或带(图版7)。这是由于大型断裂破碎带改变了地物的波谱特性,再加上断裂带内土壤、松散沉积物的富水程度及植被生长情况不同,从而表现为明显的色调异常带。色调异常分界面是指沿着某一界面两侧的色调或色彩明显不同(图版50)。在第四系沉积物覆盖区,这是隐伏断裂的表现,由于隐伏断裂两侧第四系沉积物的厚度、含水量及土地类型的不同、植被发育情况不同而在图像上表现为不同的色调。

线性构造的色调标志以MSS7波段、TM4、TM5、TM7波段的卫星图像及热红外图像的效果较好。但最有效的手段是充分利用多波段、多时相的图像进行对比分析。

2. 地貌标志

遥感图像上断裂的地貌标志有两类:一是断层三角面、断层崖、山脊线的错动等构造地貌标志;二是许多微地貌呈线状排列而成线性负地形。

这种线性负地形主要表现为:①两种不同类型的地貌单元呈直线状或折线状截然相接(图版50)。②山脊线、阶地、夷平面、洪积扇等地貌要素的错动(图版55)。③陡崖、断层三角面呈直线状断续延伸一定的距离。④呈线状展布的低洼地形,如平直延伸较远的线状沟谷或深切沟谷,呈线状展布的溶蚀洼地、落水洞、坡立谷,呈线状分布的长条形洼地、断陷盆地等。与线性构造有关的负地形不同于一般的侵蚀负地形,它们有明显的方向性,延伸较远,有时成组出现、互相平行,其展布方向与当地水系格局不一定协调。⑤线状分布的垄岗地形。断裂带的岩石被硅化,或者有酸性岩脉侵入时,由于抗侵蚀风化能力较强,常形成垄岗状地形。⑥山间洼地和山前冲积锥、洪积扇呈直线状排列,这常是活动断裂的影像标志。

SAR图像对微细地形地貌信息有特殊的表现能力,从而增强了对线性构造的识别能

力,特别是被薄沙或植被覆盖地区及地形起伏较小地区的线性构造研究上更具有优势。图版49的SAR-A图像中部暗色调区是被干沙掩盖的基岩区,雷达波穿越了薄的细砂层得到了从沙层与基岩界面散射回来的雷达波,因此可以分析隐伏的地形特征,在图像上可以解译出很多条呈暗色调的隐伏线性构造。

3. 水系标志

水系的类型、疏密、流向等特点受断裂、线性构造的影响和控制比较明显。水系解译是构造解译(尤其是活动构造解译)的重要技术手段。

断裂、线性构造主要水系解译标志有:①对口河、倒沟状水系等特殊水系类型是断裂存在的水系标志。而格子状、角状水系等则是水系发育受区域断裂、线性构造控制的标志。②水系局部河段的出现异常。如直线、折线河段和直角状急转弯河段(如金沙江石鼓河段),长而直的峡谷,河道突然加宽或变窄等。③水系河网的整体被错动。④线状排列的河流异常点(段)。如太行山东麓的浚、泚、沙洛河在隆尧的汇流处。太行山石家庄到保定一线多条河流,北东向线状排列的伏流点。像新疆叶城一带昆仑山多条河流出山后一律向左拐的改流点,都反映断裂、线性构造的存在。⑤河、湖、海岸线局部出现的直线或折线延伸的陡崖,海蚀崖定向延伸的岬角、石岛等。

4. 土壤、植被标志

断裂带上的土壤异常有时能够反映到遥感图像上,这是由于矿化作用、潜水或地表水的渗透而改变了土壤的成份,使之与周围土壤具有不同的色调及影纹结构。在干旱地区这种土壤异常能形成盐碱地或形成沿断裂带分布的盐土。由于断裂带内地下水比较丰富,有利于植物生长,因此,在干旱地区若植被沿直线状生长或带状分布(非人工林),或若干绿洲排布在一条直线上都指示可能有断裂存在。

5. 岩浆及热液活动标志

呈线状展布的多个火山口、火山锥,侵入岩体及矿化带、蚀变带等。这是解译基底断裂、隐伏断裂的重要标志。

6. 综合景观标志

大型断裂常是由多条断层成组出现的断裂带,它们一般经历了漫长的地质发展历史,控制了断裂两侧的差异性沉积作用、岩浆活动、成矿作用、构造变动等,因此,大型断裂带两侧的地貌形态、水系类型、构造线方向、构造发育程度、土壤成份、植被密度和种类、土地利用情况等都会有较大的差异,从而在遥感图像上表现为不同的色调和影纹结构。

综上所述,断裂、线性构造的间接解译标志是多种多样的,应注意综合分析,寻找多方面的解译标志互相印证,以提高解译的准确性。此外,使用不同种类的遥感图像解译时应注意成象时的照射方向与线性构造展布方向之间的关系所引起的增强或压抑效应。一般垂直或以大角度与太阳照射方向(或雷达波来方向)相交的线性构造会被阴影或明亮色调所增强;相反,相平行的线性构造则模糊不清,难于识别。这点对侧视雷达图像上的线性构造影响尤为明显。

三、断裂构造地质特征的遥感分析

遥感图像上断裂构造地质特征的研究包括断层运动方向判定、断层力学性质判定及不

同类型的断裂影像特征研究等内容。

(一) 断层两盘相对运动方向的判定

利用遥感资料来判断层两盘相对运动的方向,实际上就是有关构造地学有关证据、标志的遥感解译。如:①以不同色彩色调或微地貌特征显示的地质体(岩层、褶皱、山脊、垅岗)的错位(图版55;图版67)。②能够指示断层两盘相对运动的牵引构造(如岩层牵引弯曲,靠近断裂线的节理、劈理构造变形),派生构造(如入字型构造)。③水系、水文网的扭曲、错动。④根据断层两盘褶皱核部的宽窄变化判断。一般切割褶皱的横向或斜向断层,其上升盘相对于下降盘,背斜核部变宽,向斜核部变窄。比较褶皱核部宽窄变化时,必须选择断层两盘同一标志岩层。⑤平原区隐伏断层可以根据断层两侧第四系松散堆积物的厚度以及含水性特点判断断层的升降运动。一般断层上升盘第四系松散沉积物薄,含水量小,在图像上表现为浅色调;而下降盘第四系松散沉积物厚,含水量大,在遥感图像上表现为深色调。

(二) 断裂力学性质分析

在遥感图像上根据断裂露头线的形态、展布特点、组合规律及相应的派生构造综合分析能为断裂构造的力学性质提供证据。

1. 压性断裂

压性断裂的断层线多呈似正弦曲线的舒缓波状形状,其延伸远,总的走向也较稳定,常组成以多条平行排列的断层组成的断裂带,带内有时发育一些大小不等的透镜状构造岩块,其长轴走向总体与断裂带走向平行(图版56)。压性断裂旁侧常发育平行于断裂面的劈理、片理化带及“X”型共轭扭裂面,并常见局部地层陡立或倒转。大型压性断裂带对地形、水系有明显的控制作用,断裂带内的山脊、河谷、长条状山间盆地等与断裂带方向大体平行。

2. 扭性断裂

扭性断裂的露头线多呈窄而平直的如刀刃的直线状影像,其走向稳定、延伸远,可以穿越不同的地貌单元而保持直线状形态。扭性断裂常成组出现,彼此平行排列或斜列,并往往呈等间距出现。常见两组扭性断裂呈共轭形式相交组成菱形网格状图案,并控制一定范围的水系格局。扭性断裂在地貌上常表现为线状负地形,并沿某一方向断续延伸,且与区域总的山体、水系格局不协调。在遥感图像上沿扭性断裂常可见到地质体或地貌有明显的水平错动,或在扭性断裂旁侧出现“入”字形分支断裂、牵引褶皱、小型帚状构造等。

3. 压扭性断裂

压扭性断裂兼具压性断裂与扭性断裂的性质,其影像特征与压性断裂、扭性断裂既有相似之处,也有不同的地方,主要表现为:①压性断裂和压扭性断裂都能成组出现,但在一组近于平行的舒缓波状的断裂中,压扭性断裂常有一条较明显的主干断裂,这条主干断裂的波状形态显得比压性断裂线起伏更小,更平缓(图版50);②压扭性断裂具有扭动性质,常成雁行式排列,断裂带内的构造岩块、挤压透镜体以及由构造控制的山体和盆地的走向常与断裂带总的走向呈一定角度相交;③压扭性断裂带两侧有时会出现共轭扭裂面,但两组扭裂发育程度不一定相等;④压扭性断裂旁侧常可见到地质体、地貌的水平错移和牵引构造等现象。

4. 张性断裂与张扭性断裂

张性断裂带的断层线常呈线状或锯齿状，宽窄变化比较大，平面上一般延伸不远，断续出现或雁行状排列，而且其影像特征远不及其它力学性质的断裂明显。沿张性断裂带常发育有断层崖、陡坎等，并常有岩墙、岩脉充填。规模较大的张性断裂可形成宽大的断裂破碎带，极易被风化剥蚀而发育成一些宽窄多变、极不规则或多边形状的湖泊、盆地及沟谷，如断陷盆地、地堑、断陷湖盆等，还有“之”形的追踪张裂发展起来的河段。张扭性断裂与张性断裂的影像特征比较相近，不易区分。

一条大的断裂（带）发育地区的构造性质及活动历史的不同，因此，大断裂在不同地段其影像特征、清晰程度、构造性质、特点和规模都会有不同。这正是发挥遥感图像（尤其是镶嵌图像）视域广大，便于大区域对比其遥感特点的优点。如云南小江大断裂在东川市南、北两段其影像特征明显不同。新疆巴楚西北的近南北向断裂，在向北延入中天山后，其构造强度变弱，影像特征变得模糊。

（三）某些类型断裂构造的遥感地质研究

根据断裂构造本身的影像特征结合其断层面产状和相对运动方向的判定及其与其它构造之间的组合关系，可以在遥感图像上识别出某些断裂构造的类型。

1. 正断层

高角度正断层出露迹线较平直，沿断层线常常发育有断层陡崖和断层三角面（图8-9a），沿正断层带常出现断续的宽沟、槽状各地等。正断层常组合成地堑、地垒、阶梯状断层、放射状断层等，在地貌上表现为断陷盆地、地堑湖、地垒山、阶梯状断层陡崖等。

2. 逆断层

高角度逆断层的地表出露迹线一般较平直，中等角度的逆断层出露迹线多呈舒缓波状，连续性较好。逆断层上升盘常形成阶梯状崩落地段（图8-9b）。逆断层带的特点与压性断裂相似。

3. 平移断层和走滑断层

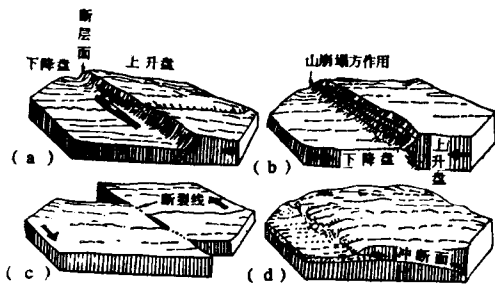


图 8-9 不同性质断层的地貌表现

（据《遥感手册》，1975）

（a）正断层；（b）逆断层；（c）平移断层；（d）逆冲断层

平移断层的影像特征与前述扭性和压扭性断裂的影像特征相似，它们在图像上表现为平直的线状形迹（图8-9c）。大型平移断层称为走滑断层，它是小比例尺卫星图像及其镶嵌图上最常见的一种大型线性构造，如我国的郯庐断裂（图版7）、阿金山断裂、北美的圣安德列斯断裂等。

走滑断层多是地壳块体的边界或大中型地质构造单元的分界线，其影像特征除具平移断层的特征外，还表现为：①大型走滑断层常由多条平行或斜列式排列的扭性或压扭性断裂组成线状构造束或带；②大型走滑断层往往分割或切过影像特征很不相同的广大区域，反映为分割或切过不同构造块体或构造域的特点。大型走滑断层带两侧的色调、影纹结构、地貌及水系类型等的差异十分明显；③沿大型走滑断层带走向出现弯曲的部位或两条雁行式走滑断层沿走向上重叠的部位常形成挤压褶皱推覆构造、断块隆起或拉张断陷盆地（拉分盆地）、张性断裂群。拉分盆地呈菱形形状，盆地两长边为平移断层、两短边为正断层，盆地长宽比为3：1左右。

4. 逆冲推覆构造

倾角十分低缓，推移距离在数公里以上的大型逆冲断层称为推覆构造或逆冲推覆构造（图8-9d）。在遥感图像上鉴别推覆构造比较困难，但仍可以通过间接和直接的标志来分析、推断推覆构造的存在，其主要标志如下：①推覆构造的地表出露迹线强烈地受地形的影响，常追随着地形等高线呈现出类似近水平岩层的弯曲形态。在很多情况下，推覆构造的地表出露迹线在推覆构造前缘呈向前凸出的弧形形态（图版57）；②在推覆构造上盘的前缘常形成由一系列逆冲断层切割成的具有同一倒转方向的线状褶皱组成的叠瓦式构造断片，在地貌上表现为相互平行的弧形山脊束，图像上常表现为密集的线性构造带；③在推覆构造上盘常可见凹向推覆构造腹地（内侧）的弧形正断层及平行于推覆方向的平移断层；④在图像上通过色调及影纹结构等标志有时可以判断出推覆构造上盘的岩石地层比组成其下盘的岩石地层为老。推覆构造经长期遭受风化剥蚀后可形成飞来峰及构造窗等现象。

图8-10是巴基斯坦苏来曼山脉推覆构造的陆地卫星图像（图版57）的解译图，其上展示了主要的推覆特征，即弧形的推覆前缘、叠瓦式褶皱断片和平移断层。该推覆构造是由从密西西比系到新第三系的岩石单元组成的向南南东方向推覆的一系列逆冲构造断片。

重力滑动构造与推覆构造的影像特征有相似之处，但重力滑动构造的变形特征是由后

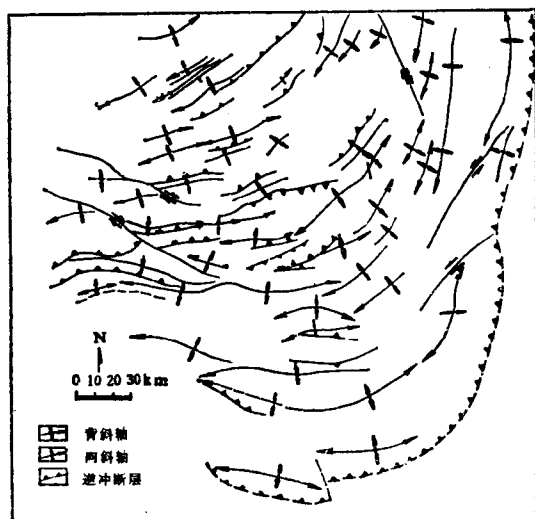


图 8-10 苏来曼山推覆构造陆地卫星图像解译图

（据C.L.Prost, 1990）

缘拉开盆地到前缘推挤带，变形由拉伸转化为挤压，且常常是年轻地层盖在老地层之上，重力滑动构造与推覆构造不同的影像特征是：①在地势上较新的滑动系统一般位于母体的下方，二者岩性相同，但构造特征不同，滑动系统多被断裂切割成不同形状的块体，构造变形强烈；②后缘拉开盆地及滑动系统上的拉开盆地在地貌上呈狭长的向前凸出的弧形盆地平行排列，盆地之间的狭长山脊亦呈向前凸出的弧形平行排列。图版55是我国塔里木盆地北缘天山南麓的柯坪山重力滑动构造，其滑动系统由古生界至中生界地层组成，图像上可解译

出由单斜构造组成的并由拉开盆地分开的五个子滑体和两条错滑断层。

5. 韧性剪切带

韧性剪切带是指一条有过相对位移，但在宏观上又未破坏其切过的地质体的连续完整的变形构造带。其影像特征如下：①韧性剪切带在遥感图像上表现为由一组相互平行、断续延伸的密集细线纹组成的线纹构造带，其宽窄变化较大，沿走向断断续续或时隐时现；②线纹构造带内部的细线纹密集程度和影像显示程度自中心向两侧未变形岩石呈逐渐减弱趋势，内部的细纹带或与线纹构造带平行或与线纹构造带总体延伸方向小角度斜交；③沿线纹构造带两侧一般见不到明显的地质体被错断或错开的异常现象。但当有明显的标志层

存在时,标志层的连续变形位移将指示韧性剪切带的存在,并能量测出剪切方向和位移距离。如图版58的北西向逆时针剪切变形将北东向的标志层剪切位移了近30公里(图8-11);④韧性剪切带常常与后期脆性断裂叠加,在图像上表现为长的线性构造与短而密集的线纹构造交替断续出现,或在一条较长较明显的线性构造的两侧有密集的细线纹带相伴出现。

韧性剪切带所表现出的线纹状影像特征的成因是沿韧性剪切变形带内线性定向组构(如条带状构造、糜棱剪切叶理、矿物拉伸线理、构造片麻理及塑性流变过程中形成的呈细条带状分布的粘土矿物和含水矿物)的差异风化有关,因剥蚀而形成的由细小冲沟和山脊,在一定宽度和延伸范围内定向地密集排列组成的微地貌异常带地段。在变质岩区的遥感图像上,如果发现与区域构造面理走向不一致的密集的线纹构造带或在大面积岩体分布区内发现狭长的细线纹密集带,都应注意是否有韧性剪切带存在。

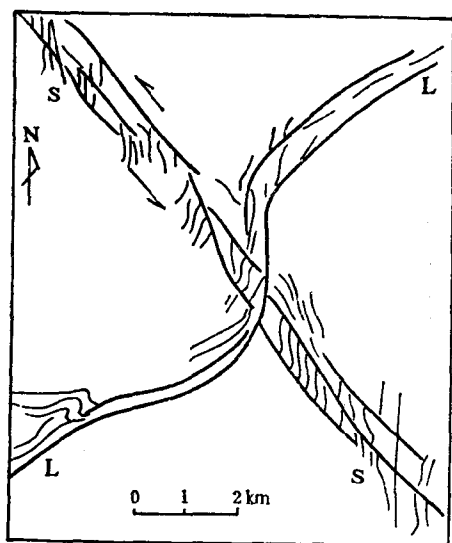


图 8-11 图版58的韧性剪切带解译图
S—S.韧性断层带, L—L.早期剪切构造带

国内应用平行等间距分布规律可以预测隐伏断裂的存在位置,还可以作为推断线性构造规模大小的依据之一。

2. 网格状分布规律

在小比例尺卫星图像或其镶嵌图上解译出的区域性或全球性的线性构造常常呈现为网格状的图形。有些学者认为,这是由于地球自转产生的南北向压应力而形成的具有全球性分布的北西和北东向展布的两组剪切构造及南北向的张性和东西向的压性线性软弱带。有些学者认为,不同陆块上北东向和北西向两组剪切线性构造角度的偏差,可能指示了不同陆块之间相对的漂移运动。

3. 模式组合规律

一些局部的构造的解译,可能找到类型上一些线性构造组合模式。如果能把这种组合模式与大区域构造应力场所形成的线性构造区分开来,从而能帮助对局部构造的识别,这对隐伏构造解译尤为有用。如图8-12所示,小侵入体或火山管道上方常产生放射状模式;较大的侵入体或大盐丘顶部可能形成一种空心的环状—放射状模式;紧闭背斜轴部可以发

四、断裂、线性构造解译资料的分析方法

在遥感图像上解译出的大量线性构造在研究时需要作进一步的统计和归纳分析,以便正确地认识一个地区的断裂、线性构造的发育特点和空间分布规律。

(一) 线性构造的空间分布规律

同一应力场作用下形成的断裂线性构造,其空间展布的特点主要表现为:

1. 平行等间距分布

在同一地区同一应力场作用下形成的同一规模、同一性质、同一方向的线性构造在空间上具有平行等间距分布的规律,这种分布规律具有区域性特点,与水平挤压地应力波动传递方式有关。线性构造的规模与其间距成正比,规模越大,间距越大。在一定范围

育平行的张性断裂；开阔背斜轴部常产生张性断陷构造；盐丘褶皱上的断裂在其尾部常具有向外张开分叉的趋势；在时代较新的盐丘及穹窿构造的边缘常出现断续的环状—放射状断裂。

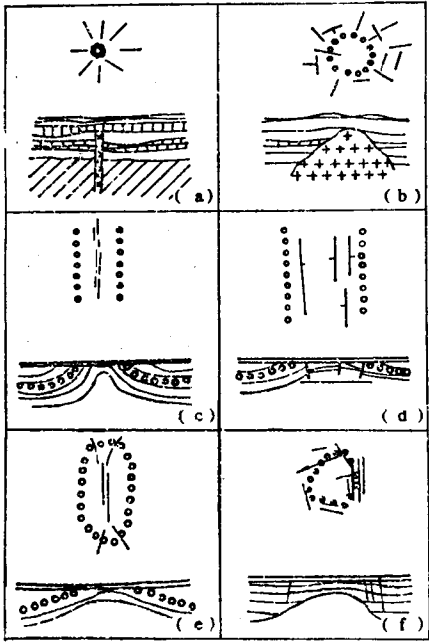


图 8-12 构造模式图

(a) 小型侵入体；(b) 规模较大的侵入体；
(c) 紧闭背斜；(d) 开阔背斜；(e) 盐丘；(f) 穹窿构造

利用线性构造的平面组合模式可以作应力场分析及断裂性质、类型、构造形成序次等研究。把线性构造平面组合形态与构造力学结合起来，按照一定的应力模型对线性构造作必要的分类、筛选和赋予相对时代的含义，对正确认识区域构造特征具有重要意义。

(二) 线性构造统计分析方法简介

为半定量或定量地研究线性构造的空间分布规律，通常基于概率论并应用数理统计的方法来研究线性构造的长度、密度、频率、方位等特征。这些统计分析资料，有利于降低目视解译中主观任意性带来的影响，还便于和物化探资料对比分析和进行多源地学数据的综合处理。线性构造统计分析的基础资料是遥感图像线性构造解译图或计算机自动检测提取的线性构造图，分析所用的基本数据是线性构造的长度、方位和数量等。在分析中一般把线性构造都作为直线段看待。随着计算机技术的引入，线性构造统计分析的速度和效率得到大大的提高，并且统计方法也越来越多，如方位分析、密度分析、偏差指数分析、方位异常度分析、优益度分析、空间距离测度分析、趋势面分析等等（庄培仁等，1986；王润生等，1992）。下面介绍两种常用的方法：

1. 方位分析

方位分析的目的是了解区域或局部线性构造展布方向的特征。全区方位分析是在全区线性构造解译图上统计各方位（角度）区间内线性构造的条数或总长度，根据线性构造数量的多少，角度间距一般以 5° 或 10° 为宜；局部方位分析是将全区线性构造解译图按一定的网格划分出统计单元，统计每个网格中的上述数据。一般将统计数据用玫瑰花图或直方图表示。

玫瑰花图是在半圆内（ 180° 空间）或圆内（ 360° 空间）按角度区间，以半径表示线性构造的条数或总长度，从而作出方位—长度玫瑰花图或方位—频数（条数）玫瑰花图。在作玫瑰花图时，可以按一定间距的规则网格作出规则分区的玫瑰花图，也可以按地质单元、构造单元或自然地理单元作出不规则分区的玫瑰花图，用来对比不同单元中构造特征的差异。直方图多用来作全区方位分析，其作法是以线性构造方位角为横坐标，各方位区间内线性构造的频数（条数）或长度和为纵坐标，可作出方位—频数直方图和方位—长度直方图。上述图件可以用以确定线性构造方位分组，了解区内线性构造优势方位，作区域

构造应力场分析的辅助资料，区分区域构造和局部构造的关系等。

在方位分析时应注意，在不同比例尺的图像上或不同尺寸的采样网格上取得的统计分析结果会有差异的，这可能反映了区域线性构造（大型断裂构造）和局部线性构造（断层、节理）之间的序次关系；也可能是不同比例尺遥感图像对线性构造抽象能力不同有关。

2. 密度分析

密度是指每一统计网格单元内线性构造的总长度或总条数或线性构造结点数等，这些统计数据常用等密度图（密度等值线图）来表示，还可以借助图像处理技术变换成灰度图像或彩色图像。线性构造等密度图反映了线性构造空间密度分布的数字特征和结构特征，这些特征可以提供隐伏构造、深部构造信息和提供找矿线索。

等密度图的基本作法是以一定的采样网格（一般采用正方形网格）对线性构造图采样，计算每个网格（即单位面积）内线性构造的总长度或总条数或不同方位线性构造交点数，将这些数据置于各网格的中心，然后以这些数据选择合适的密度间隔插值作出相应的平面等值线图。如线性构造长度（或条数）等密度图，线性构造结点（交叉点）等密度图。在实际工作中既可作全方位线性构造等密度图，也可以作某一方位线性构造等密度图（如南北向、东西向、北东向、北西向），用来研究这一方向线性构造的发育规律、分带特征等。此外，还可以在同一张线性构造图上采用不同大小的采样网格作出一系列等密度图以分析不同规模的线性构造特征，一般所划分的采样网格的尺寸应与所要研究的线性构造的规模大体相当，如研究断层、节理等分布特征时可采用较小的网格，研究区域大型断裂构造分布特征时宜采用较大的网格。有时在统计过程中常对大型线性构造赋以一定的加权值，以达到突出区域大型线性构造的目的。

对线性构造统计资料的解释和分析应用，是遥感构造工作重要内容。解释和分析一定要：第一，根据地质实际来进行正确解释；第二，在紧密围绕研究工作的目的来进行。

线性构造的方位统计资料，通常可以回答研究区的线性构造优势方位、分组特点。与地面地质配合，有时还可以有助于对区域构造应力场的分析。对密度统计资料的解释应用，随具体情况而异。通常高密度异常区常代表断裂或褶皱的发育部位，低密度异常区可能代表构造相对稳定的地块或第四系覆盖区，呈面状分布的高、中、低密度区常与一定的岩性分区有一定的对应关系。其次是进行密度异常区的形态结构分析。按高密度及低密度圈闭区等值线的形态、延伸方向、密度梯度带的延伸方位等可以确定区内主要线性构造的发育部位及分带性等。如单向延伸的高密度区或密度梯度带可能代表着大型断裂构造或隐伏断裂构造的分布位置及延伸方向；外围为低密度区、中间为高密度区或外围为高密度区、中间为低密度区的环形闭合等值线可能表明隐伏的穹窿构造或等轴状侵入体、火山机构等环形构造的存在；单向延伸的高密度异常区的相间分布代表了线性构造的分带性等。此外，对线性构造等密度图的解释还应结合所掌握的地质资料和物化探等资料，特别是与相应比例尺的航磁图、重力资料进行对比，以揭示深部构造特征，与相应比例尺的化探资料对比，来分析控矿构造和容矿构造的特征等。

第四节 环状构造解译

一、环状影像与环状构造

在遥感图像上由色调、水系、影纹结构等标志显示出的近圆形、空心的环形或未封闭的弧形等影像特征称之为环状影像或环状形迹。构成环状影像的地表因素很多，一些是地质构造成因的，如火山机构、岩浆活动中心、岩体、盐丘、穹窿等表现的环状影像；一些是人类活动的痕迹，如圆形、环形的水库、人造林、各类人造工程等；而另一些则是自然地理、地貌现象，如近圆形的湖泊、风化残山、冻土鼓丘、弧形的牛轭湖等；还有一些是宇宙作用成因的，如陨石坑。

为了突出地质意义，将那些成因上与地质作用或宇宙作用有关的环状影像称为环状构造或环形构造。

二、环状构造的影像特征

在遥感图像上，环状构造大多数是通过色调环、地貌环、水系环、植被环、影纹环或它们的复合类型的环状特征表现出来。

山区的环状构造多表现为环形或弧形分布的山脊、沟谷，近圆形的山体或山间盆地，或以放射状、向心状、环状水系等表现出来，有些环状构造是由于环内具有可与背景相区别的特征的影纹、色调（色彩）晕而显示出来。平原地区的环状构造多表现为环状色调异常，其轮廓较模糊或呈晕环状，而且环的不同部份的色调也有变化。这种色调异常的原因大多是由土壤的成份，含水量及植被发育的不同形成的。平原地区有些环状构造是由环形或弧形分布的残山、地表小型水体、以及由呈圆形组合的斑点状、斑块状影纹表现出来。跨越平原和山区的大型环状构造，通常是山区那部分的环形轮廓较清楚。

对环状构造的描述与分级、分类包括：①对单个环状构造平面几何形态、规模、产出特点的分类；②对环状构造的空间分布及组合特点的分类；③最重要的当然是对环状构造的地质成因分类。

对单个的环状构造的描述分类，按其直径的大小，大的可达数百公里，穿过地表上的各种地质界线，小的可以只有数百米。可以按环状构造的长轴走向的方位来分组。可以按单个环状构造的平面几何形态分为弧形、圆形、多边形等。对环状构造的空间分布和组合特征的描述、分类，如环与环的组合特点分为同心或偏心环状、内切或（和）外切环状、交切的环状等等形式。对其空间展布、环状构造有时呈线状串列、雁列、或成集群产出，当然也有零星分布等。它们的展布特点，常常与不同构造单元或区域构造的特征有关。

环状构造当前还没有统一地学成因分类，主要有下列几类：

（一）与构造成因有关的环状构造

包括：①短轴褶皱、叠加褶皱形成的穹窿和构造盆地、前寒武纪变质岩系组成的基底穹窿构造；②隆起与拗陷盆地；③旋扭构造形成的弧形、涡轮形、环形组合的断裂；④各种构造岩块、地块；⑤盐丘底辟构造、古潜山、隐伏礁体。

（二）与岩浆活动成因有关的环状构造

包括：①火山机构环状构造，如火山锥、火口湖、破火山口等；②隐爆角砾岩筒造成的环状构造。由于其上的岩石破碎带常常遭受较强的热液蚀变，在图像上表现为由隐现的环状、放射状断裂和色调异常斑块组成的环状影像；③岩株、岩枝等中小型岩浆岩体、岩浆杂岩体及变质岩区由混合岩化作用或古老侵入体反映的环状构造。岩浆杂岩体环状构造是在特定的大地构造环境下由一系列时代不同，但有成因联系的岩浆杂岩体为主体和与其伴生的各种构造形迹（如岩浆岩体内部构造、边缘环状断裂、环形、弧形断陷沉积盆地或火山岩盆地等）共同组成的环状构造。

（三）热液蚀变、烃类扩散、热辐射等成因造成的环状构造

包括：①热液蚀变成因的晕圈状色调（色彩）异常，其边界模糊不清，常出现在两组或多组线性构造的交汇部位，规模一般不大；②油气藏上方的烃类微渗漏形成的“雾状异常”或“晕圈状异常”。这是由于油气藏上方不断渗漏到地表做烃类物质改变了环境条件，导致地层、岩石、土壤的物理化学性质变化及所引起的地表植被的异常等，在多波段遥感图像上表现为模糊的“雾状”或“晕圈状”的色调（色彩）异常；③地热资源常在热红外图像上呈现为“雾状”或“晕圈状”色调（色彩）异常。

（四）地学成因未能确定的环状构造

根据地质及地球物理资料初步判定与地质成因有关系，但又无法查明其具体成因，这类的似环状构造在有时占有很大的数量。对这类环状构造的标绘要细微慎重，但也不宜随便抹去，因为这可能包括一些有用的地学信息。

（五）陨石撞击成因的环形构造

严格来说，它不是地质成因，但仍与地学有关的环状构造。太阳系的各个行星、卫星（火星、月体等）表面都有大量陨石撞击而成的环形山，但地体却很少见到。地面已确认的环形陨石坑很少，在我国就更少。如有人认为太湖湖盆是陨石坑。

由于技术手段等多种因素的限制，对环状构造的地质成因、机理的研究还不深入，但是它的地学价值却不能低估。其一是因为环状构造与区域成矿关系密切，环状构造某些部位，如边部及中央、或与线性构造交切点，常常是成矿有利地段。其二，环状构造（尤其是大型的）可能与深部地质构造作用有关。关于环状构造的起因及形成机理，推断与下列几种地球动力作用有关：①陨石坑撞击假设（暂归入地学作用范围之内）；②深源热能冲刺假说。认为可能是地球深部的高能热核反应引起地球内部物质向外壳冲击，爆炸而产生的地壳构造，或是由于能量上冲引起大气异常变化而产生的“晕梢”辐射被遥感器接收；③热湍流成因假说；④热动力岩块假说；⑤地球自转成因假说等。这些假说各有一定的根据与理论基础，但都不够完善。环状构造的成因是遥感技术向地质学提出的新课题，对于这类新的地质信息的深入研究，有助于提高人们对地球的形成和演化历史以及区域成矿的认识。

第五节 隐伏构造与活动构造的解译

一、隐伏构造的解译

隐伏构造是指被第四纪松散沉积物所掩盖，或隐伏在表层基岩下面的地质构造。由于

遥感具有图像视域广和多波段、多时相等优点,又可以通过与地球物理、地球化学等多源信息复合来提取信息,有利于对隐伏构造进行综合解译与宏观分析。

(一) 松散沉积物覆盖区隐伏构造的解译

松散沉积物覆盖区隐伏的断裂、断块、褶皱和岩体,主要是通过色调、色彩的差异、异常的水系和微地貌等标志显示出来。隐伏构造的影像清晰度取决于新构造运动的强裂程度、上覆沉积物的厚度等因素。

1. 隐伏断裂的解译

松散沉积物下的断裂大多数都以色调、地形、植物等标志的面状或线状影像特征显示。陆地卫星MSS包头幅图像上,黄河南岸的多条支流作同步的“S”形拐弯,表明一条东西走向、反时针运动的隐伏断裂的存在。在陕北定边地区的MSS图像上,一条走向近南北的隐伏断裂的存在,使得上覆黄土层内发育的冲沟及微水系的密度明显不同,西侧冲沟宽深较稀,显示两盘抬升的特点(图8-13)。天池幅MSS图像上白头山一带火山口呈北东向和北西向排列,但总体方向近东西,说明这些火山口除受北东向和北西向断裂控制外,还受隐伏的近东西向基底断裂控制。黄淮海平原上的隐伏断裂标志,在很小比例尺的全国陆地卫星镶嵌图上都非常明显,如冀东地区唐山市以南,隐伏近东西向断裂造成色彩、地貌、水系、土地利用特点等综合标志不同。

2. 隐伏褶皱构造的解译

隐伏褶皱构造在图像上常以色调、水系和微地貌显示,在色调上以不同的色、形显示,如具有同心圆状的环、椭圆、半环状的色带,或不规则的条带状褶曲等。一般情况下背斜色带较窄,向斜色带较宽。例如保定幅卫星图像上,在任丘附近有一些隐晦的色环条带,是隐伏的背、向斜构造,这是良好的储油构造。隐伏的褶皱构造在水系上常以放射状、向心状、环状或弧形水系显示。如北京地区新隆起表现在温榆河和永定河发生偏移绕流,形成北北东向环形构造。图8-14在地形上隐伏的褶皱以微地貌的展布规律显示。如河北迁安地区,在滦河冲积层下埋藏的太古宙穹窿,在遥感图像上以环状残山显示。残山以太古宙磁铁石英岩为主,在航磁异常平面上呈不规则圆形,与遥感地质解译基本吻合。除上述外,隐伏构造还可以通过植被的生长状态间接地显示。如隐伏储油构造区,油气经过构造裂隙向地表渗透,喜烃的植物生长茂盛,在遥感图像上植被生长的轮廓与储油构造的形状基本一致,因此植被的生长状况和分布范围也是推测隐伏褶皱构造的重要标志。



图 8-13 陕北定边地区黄土层下的隐伏断裂MSS图像



图 8-14 北京地区圆形新隆起的地面显示
(引自《遥感图像地质解译教程》)

3. 隐伏断块和岩块的解译

在遥感图像上隐伏断块和岩块以多边形或环状线性呈现, 这些线性也可以色调的差异显示。在地貌形态上呈凹地、轻微凸起、沼泽化和盐碱化等。在图像上隐伏断块和岩块水系呈角状、直线状和弧形水系。在活动强烈的构造上升区, 这些标志更为明显。例如在石家庄幅陆地卫星图像上, 太行山东麓邢台至石家庄一带有多条大体平行的东西向河流, 经邢台—沙河一带河流流向变为南北向, 流至隆尧—新河一带汇合一起, 形成一个弧形环状构造, 显示隐伏断块的存在。当隐伏断块和岩块埋藏较深、地表影像比较隐晦时, 可借助计算机图像处理增强信息或多种图像对比分析, 结合象航磁等地球物理资料进行信息复合与综合分析, 可以取得较好的效果。

(二) 基岩区隐伏构造的解译

基岩区的隐伏构造发生在山区, 以线性和环形影像反映, 它与基岩区本身的影像往往叠加在一起, 使人难以正确判别它。它的主要解译标志是水系、微地貌和影纹特征等。基岩区的隐伏构造有的比较单一, 它以明显的特征标志显示, 例如火山锥、岩株、湖盆呈直线形展布, 显示其下部有一隐伏断裂; 地貌上山脊突然中断, 山麓交互地带呈折线或直线展布或洪积扇呈线性展布, 其深部有隐伏断裂; 大型平行状水系, 切割深、延伸长等都是隐伏断裂的反映, 如红河断裂等。基岩区的隐伏构造有的比较复杂, 往往以不同花纹的影纹叠加呈现, 不同影纹的斜交或切割, 显示出隐伏构造与表层构造的相互关系。例如敦化幅卫星图像上有一隐伏的褶皱构造。该区大面积花岗岩出露, 古生代地层零星分布, 在遥感图像上敦化—桦甸—金银一带隐显出近东西向褶皱条带, 其北翼被北东向致密断裂切割, 并被第四纪玄武岩所覆盖, 其南翼被北西向断裂切割, 并被花岗岩形成的环形构造所叠加。根据它的影纹分布特征, 恢复其形态为隐伏褶皱构造, 并得到航磁的证实(图版59, 图8-15)。

大量事实证明, 应用遥感图像与物、化探相结合研究隐伏构造, 其效果较理想。例如广西南丹县大厂多金属矿区隐伏花岗岩的预测。在河池幅MSS计算机处理图像上, 在南丹县大厂附近有一椭圆环形构造, 呈北西向展布, 其周围有大小不同的环形构造叠加, 形成套嵌状的环形构造, 并有错移现象, 反映出岩体侵位深度上有差异, 也证实了该区存在着隐伏岩体。在重力和航磁异常图上证实了岩体受北西向和北东向断裂构造控制。隐伏岩体的起伏形态控制了矿体的分布, 其形态特征和多金属次生晕的分带性以及图像处理色调异常相一致(图8-16, 8-17; 图版60)。经地质、航磁、重力、化探和遥感图像的综合分析, 证明大厂矿区下有隐伏花岗岩, 受北西向丹池褶皱构造所控制。环形构造是由燕山晚期岩浆多次侵位形成, 证明花岗岩和多金属矿都分布在两组断裂的交汇处或三组断裂交错的三角部位, 为寻找隐伏盲矿体提供重要依据。欧阳成甫等(1990)利用卫星图像与铅的原生晕四次趋势面分析资料确定云南澜沧老厂银铅矿的环状构造是隐伏花岗岩体。

从上面的实例可见, 隐伏构造遥感解译的要领是: 第一, 是对邻区构造的对比分析, 尤其是在第四纪沉积物覆盖下的隐伏断裂, 可以利用邻区基岩区的构造解译成果与之对比分析。第二, 要充分应用多源信息的综合分析。第三, 要对区域构造展布规律及构造型式作研究, 从中发现一些与盖层基岩区构造格局不相协调的构造特征异常。相反, 常用的地貌、色调等标志却变得比较次要。

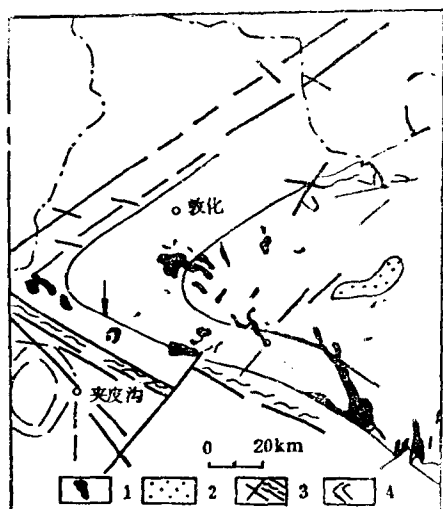


图 8-15 敦化幅卫星图像基岩区隐伏褶皱构造解译图

(据刘允良等, 1992)

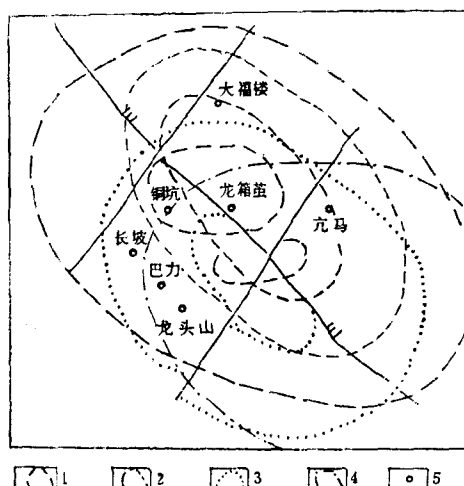


图 8-16 大厂矿田多种环形异常综合解译图

(据李恭等, 1985)

1. 下古生代地层; 2. 上古生代地层; 3. 断裂; 4. 褶皱构造 1. 重力; 2. 航磁; 3. 化探; 4. 遥感; 5. 矿床

二、活动构造解译

活动构造是现今仍在活动的构造。它包括断裂、隆起和拗陷。活动构造常继承在老的构造基础上, 因此在遥感图像上具有新、老构造影像叠加的特征, 不易区别。在构造活动强烈地区形迹明显, 图像上能直接判别; 在构造活动微弱区形迹隐晦; 在构造活动稳定区形迹不明显。活动构造常引发地质灾害如地震、滑坡、泥石流等, 是环境遥感中重要的研究内容。

(一) 活动断裂构造的解译

活动断裂的标志与断裂构造标志相似。活动构造在地貌上往往出现在不同的地貌景观的分界线上, 或从特定的几何形态沿某一方向延展, 在分界线上有断层崖、洪积扇、热泉、火山口等的线性排列, 例如云南红河断裂带和鹤床—洱源断裂; 高温温泉集中出露, 它呈线状排列, 延伸长, 泉眼数量多、流量大, 证明这两条断裂不但活动性强而且深切地壳深部。图8-18在第四纪沉降区活动断裂常以湖泊、沼泽、盐碱化和植被的定向排列而显示。如西藏西林沱幅卫星图像上, 格仁错湖被北西向申札断裂所控制, 沿断裂带有一系列的湖泊呈线状分布, 影像十分清晰。活动断裂往往控制着水系的异常点, 如水系的交叉点、分流点、汇集点、拐点等呈线状排列。河流由宽变窄或窄突变加宽等也是活动构造的标志。如广西钦州至防城一带, 在卫星图像上茅岭江和防城河都发生左旋错动, 河流形成倒钩状呈倒“L”形, 其拐点呈北东向展布, 它是防城—灵山活动断裂带的影像标志。活动构造还以明显的色调差异显示。一般情况下埋藏浅或活动性强的活动断裂, 色调差异明显, 反之则不明显。例如山东沂水幅卫星图像上, 沂沭断裂由四条北北东向断裂贯穿全区, 线性构造的两侧有明显的色调差异, 中间呈浅色调, 两侧呈深色调, 在图像的北部活动断裂控制了上新世玄武岩的出露, 说明沂沭断裂是活动断裂。

地震活动带, 近代火山喷发区都是活动断裂的标志。例如美国加利福尼亚州1992年6

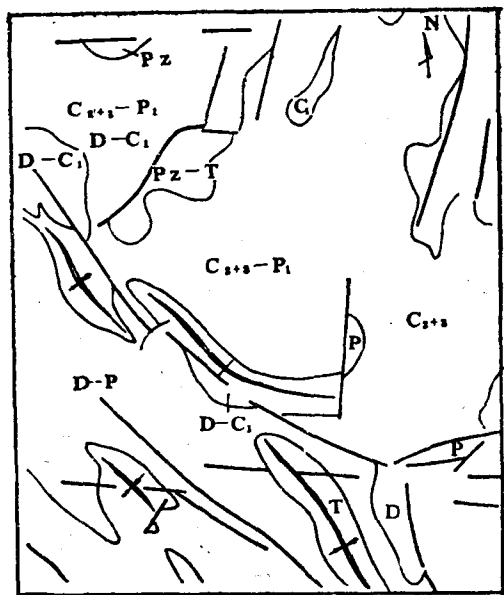


图 8-17 广西南丹地区卫星解译略图

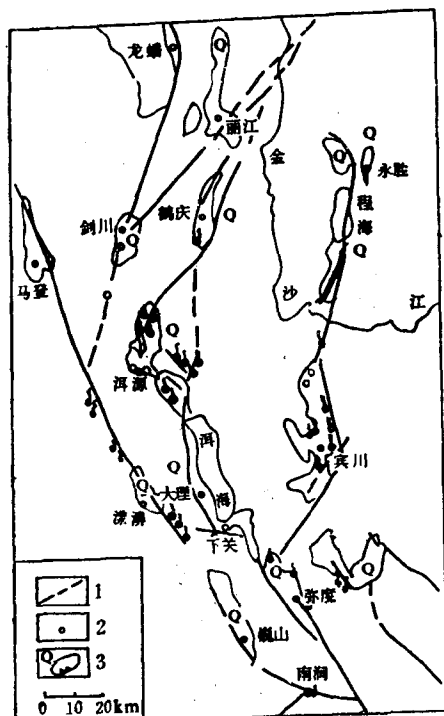


图 8-18 滇西北地区活动断裂与温泉分布图

1. 活断层；2. 温泉点；3. 第四纪盆地

月发生六级以上强烈地震，在遥感图像上可见到埃默森断裂向北西方向延伸，活动断裂使道路围栏和地面设施相对移动3.5--6m。

(二) 新隆起的解译

断块隆起、阶梯状隆起、掀斜隆起和穹状隆起都是常见的新隆起构造。断块隆起和阶梯状隆起受活动断裂构造控制，其边界清楚，形状呈长条状、块状、圆形或不规则的环形。地貌上山脊线走向稳定，水系呈梳状，山麓交互地带发育着断层崖和洪积扇。例如陕西西乡卫星图像上北北东向钟家沟—堰口断裂具有多次活动的特征，影像清楚表明其北盘断陷下降，其南盘被多条线性断裂切割，并有节律性地上升形成阶梯状的隆起，影像十分清晰。掀斜隆起是大面积不均匀抬升而形成，在遥感图像上河流向一侧迁移，河谷深切，呈直线形，河曲不发育，而另一侧往往洪积扇呈带状分布。

(三) 活动拗陷的解译

活动拗陷常发育在活动断裂带之间，地形上呈盆地、湖泊等，形状复杂，有三角形、槽形、多边形、菱形、新月型、纺锤形或斜列式等。它们受不同构造所控制，一般，槽形、长方形与张应力有关，菱形与扭应力有关，纺锤形与压应力有关，多边形和三角形是不同方向断裂切割而形成，活动拗陷的水系呈向心状、辫状，河流宽阔，河漫滩、牛轭湖和沼泽发育。根据拗陷的形态特征可分为断陷盆地、拉伸盆地和裂谷盆地。断陷盆地是在长期活动断裂基础上发育的，边界色调差异清晰，盆地内阶梯式地形发育并有洪积扇覆盖，如鄯庐断陷盆地。拉伸盆地具有一定几何形态或组合特征如槽形、长方形、斜列式等。我国山西大同盆地、太原盆地、临汾盆地呈北北东向斜列式排列，盆地边缘常有走滑断裂伴生并有断层三角面或叠置的洪积扇，地貌影像清晰。裂谷型盆地是由大型走滑断裂

组成,水系的主流呈平行状水系,其支流呈梳状水系。山脊线走向稳定,延伸长,例如红河裂谷带等。我国活动拗陷盆地很发育,但差异性很大,有些拗陷盆地中第四纪堆积物厚达千米,有的仅几十厘米以至基岩出露。拗陷盆地往往发育着活动断裂,常发生一些地震,例如临汾盆地的强烈活动,造成1303和1695年发生两次8级大地震。

第六节 遥感构造编图

遥感编(制)图就是把构造解译成果(包括地面检测的资料)汇编成图的工作。如果把遥感地质编图理解为利用遥感地质解译资料来编制地质图件的话,那么,岩性解译、构造解译、遥感成矿预测等的编图,都可以看成是遥感地质系列编(制)图的一个图种。第六章第五节已介绍了包括岩性解译编图,在此,重点介绍以遥感方法为主的区域地质编(制)图的一般方法、原则与步骤,当然也适用于遥感构造编图。

一、遥感构造编图的精度

利用遥感解译成果编制地质图件时,有一个图件精度问题,它包括:①解译地质体界线的转绘精度;②作为编制底图的遥感图像的几何精度;③多源信息复合时重采样的像元的大小等。

编制遥感地质图时,常常使用的是镶嵌图像。从制图角度来看,必须考虑遥感图像的几何精度是否符合同比例尺地形图的精度。TM及HRV图像的几何精度按原设计标准是可以达到1:50000的精度,而无需再加工,但因图像放大等会引起误差,因此,使用前应当检查图像的几何精度。如果使用航片镶嵌图作为底图时,就要进行有控制的航片镶嵌,须用专业人员处理。对航片解译地质成果的转绘,有三种方法,即目估法、作图法及仪器转绘法(有关内容查阅“遥感图像地质解译教程”)。当使用多源信息复合资料时,各种资料的比例尺、像元大小都必须匹配,有关内容请参阅第十章的第一节。

上述方法、原则也适用于其它遥感编图。

二、遥感构造图的种类

主要有:①断裂、线性构造解译图;②环状构造解译图、岩体环状构造解译图;③解译构造纲要图;④解译剖面图;⑤综合性的构造解译图件。

此外,还可以派生出如线性构造等密度图、线性构造交切点统计图。另一类是把上述构造解译成果,叠加在遥感图像上,构成遥感影像构造图。

三、解译构造剖面的编制

解译剖面的编制,是构造、岩性、地貌遥感解译的重要内容。因为它能把各种解译标志综合起来,有助于解译者对区域解译特征规律的总结和解释标志的建立。当我们需要对解译成果进行地面验证、检测而选择路线时,解译者应当作出路线区的综合性解译剖面草图。当选择区域的岩性地段、地貌、构造典型样区,选择波谱测试的地点时,解译者也应当有此类剖面图。如果需测制反射波谱剖面图图7-19时,那就更必须有经过实地检测的解译剖面草图。

第九章 多波谱遥感资料在矿产资源勘查中的应用

各种矿产资源的形成、产出，都与一定的地质构造条件有关，如斑岩铜矿与中酸性侵入体有关，煤矿赋存在某些地质时代的煤系地层内。利用多波谱遥感资料来解译、分析区域成矿地质条件，提取某些矿床类型的遥感标志是遥感找矿的基本出发点和理论依据。当前，遥感技术在找矿工作中的应用可归纳为如下几个方面：

1. 利用图像上显示的与矿化有关的地物如岩石、土壤等的波谱信息、色调异常和热辐射异常等直接圈定靶区，为找矿指明方向。
2. 利用解译获得的资料，分析区域成矿条件，进行区域成矿预测。
3. 利用数字图像处理技术，进行多波段、多种类遥感图像的综合处理分析，增强或提取图像上与成矿有关的信息，尤其是矿化蚀变信息，为找矿提供依据，指明找矿方向和有利成矿的远景地段。
4. 利用数学地质方法，综合遥感资料、物探、化探和地质资料，进行成矿统计预测，直接圈定找矿远景靶区（详见第十一章第三节）。

第一节 遥感找矿标志

一、采矿、冶炼遗迹

在大比例尺、高分辨率遥感图像上，采矿、冶炼的遗迹主要有老矿硐、采坑（场）、废石和矿渣堆、淘沙坑、冶炼遗址等，它们在遥感图像上有特殊的形态与色调特征，容易解译和识别。

老矿口在黑白航片上呈黑色孔状斑点，采坑为形状不规则的洼地。采矿硐和采矿坑都有小路相通，但是老矿硐和老矿坑规模一般较小而不规则，硐口塌陷或生长有植物，在图像上往往较为隐约模糊。

近代采矿场通常有一定的几何图形（如矩形、梯形、长条形、半圆形等）的低凹地带，附近有矿石堆和废石堆，并有简易公路或小路相通，需要综合分析判断。采矿场的色调取决于矿种及其风化物的颜色，如石灰岩开采场、砂矿开采场在图像上表现为浅色，而铁矿、煤矿的开采场则为暗或黑色。在彩色航片上表现为鲜艳的颜色（与背景有明显差异），而在黑白航片上表现为不同的色调。冶炼厂和炼渣常表现为有一定布局的暗色突起状斑点。

这些旧矿遗址，一般规模较小，形状不规则，呈斑点状零星分布，不易发现；但当这些遗址沿一定方向作规则分布，并与一定的成矿地质条件（如一定的岩层层位或构造条件）有关时，则极易发现。若历史资料已有记录，就可以作为寻找矿体的一个有用标志。

二、含矿体的影像特征

矿体出露地表的面积较大时，在高分辨率图像上（主要是航空图像），可直接识别。一般情况下，这些含矿体有独特的影像特征（形态特征和色调特征）。

铁矿，包括磁铁矿和部分赤铁矿层，因坚硬而表现为长条状垅岗正地形，呈深色调，如冀东的鞍山式铁矿常突出在变质岩系构成的山岗顶部。我国西北地区，煤层为黑色调，呈槽沟或条带状负地形，其走向与围岩层理一致，如我国马鬃山煤田表现为煤层露头沿走向延伸。大理岩、盐类矿产、含矿伟晶岩脉、石英脉则呈现浅色调，并往往呈环状、透镜状或长条状分布。

各种金属矿体露头，特别是富含硫化物矿体的露头，经风化淋滤作用后形成的氧化物或含氧盐类矿物，呈现出与围岩迥然不同的色彩，如表9-1。

表 9-1 各种金属矿体氧化露头的色调特征

金属矿床	氧化露头的氧化矿物	在彩色遥感图像上的色调	最大亮度值出现的波段(MSS)
氧化铁	针铁矿、赤铁矿、褐铁矿、硫酸铁矿	黄、褐、枣红	5, 6
铅	复硫酸盐、磷酸盐	黄、黄绿	5
锰	氧化锰、锰土	黑	4
铜	硝酸盐、硅酸盐、碳酸盐	绿、蓝	5
钴	氧化物、自然钴、钴华	黑、粉红	4, 6
镍	镍华、硅镁镍矿	绿	5
钼	彩钼铅矿、钼华	鲜黄	4
银	氧化物、自然银	翠绿	5
砷	氧化物	褐黄	5
铋	铋华	黄	4
镉(含于锌之中)	氧化镉	淡黄	4

(据陈华慧等)

三、围岩蚀变

围岩蚀变的种类较多，而且不同矿化作用所产生的近矿围岩蚀变也不同，如与云英岩化有关的锡、钨、钼等矿产；与矽卡岩化或热液作用有关的铁、铜、多金属和钨、锡等；斑岩铜矿则具有从内至外依次为钾化-绢云母化-泥化-青盘岩化-次生石英岩化的蚀变分带。围岩的蚀变由于物理性质的变化，风化剥蚀后产生一些特殊的地貌特征，如硅化、矽卡岩化、次生石英岩化等，使岩石变得更坚硬，表现为条带状或不规则状的正地形。而高岭土化、绢云母化、绿泥石化、滑石化、黄铁矿化则往往呈不同色彩色调的负地形，且会使水系发生局部变异。由于蚀变使岩石结构构造发生变化，如层理消失或片理化，或出现热动力化变质晕圈等，这些也会在微地貌、影纹图案上有所反映。

围岩蚀变产生的某些特殊蚀变矿物相对富集，与未蚀变岩石相比产生波谱和色调、色彩异常。图9-1、9-2是几种主要热液蚀变矿物和它们的风化矿物的波谱曲线。表8-2是几种与蚀变有关的岩石、矿物的色调特征。

四、油气渗漏的遥感检测及机理

埋藏在地下深部处于相对动态平衡状态下的油气藏，其内部有很大的压力，与地表有

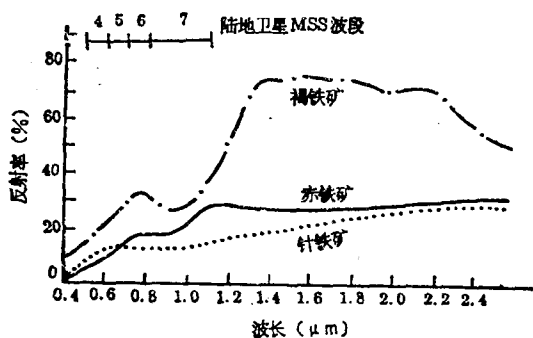


图 9-1 含氧化铁矿物的反射波谱特性曲线及MSS相应波段

(据Salisbury, J.W.和Hunt, G.R., 1971)

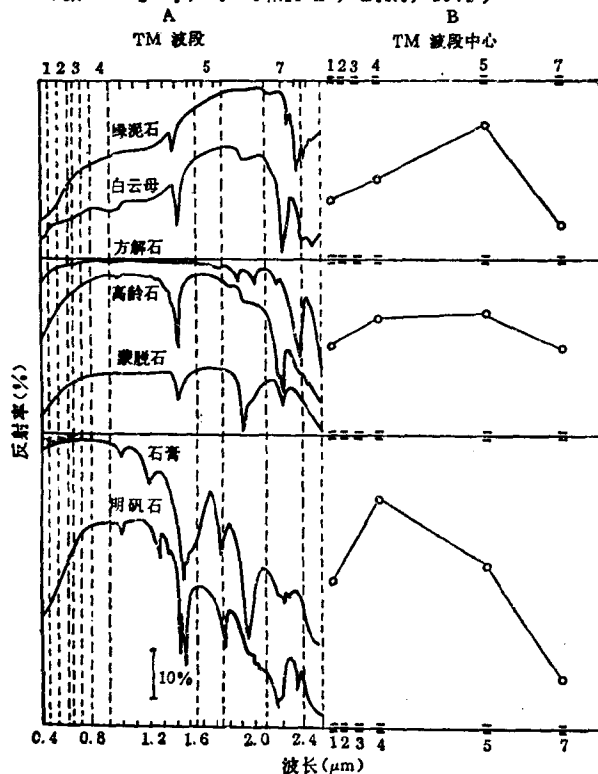


图 9-2 主要蚀变矿物的反射波谱曲线

(据D.H.Krepper, 1989)

A.波谱曲线; B.TM波段相应亮度的变化特征

着巨大的压力差,由于岩石内部存在裂隙、节理、断层等,使烃类物质通过压力、水动力等多种途径向地表渗漏,形成目视不可分辨的油气显示,称为油气藏烃类微渗漏现象,它必然会引起油气藏上方地表出现异常,主要表现为:土壤烃组分异常、红色褪色、粘土矿物丰度增大、碳酸盐总量增高、地表放射性异常、热惯量异常和局部植被生态异常等。

例如,美国的T.B.Segler(1984)等在犹他州里斯本油田的研究,利用航空主题绘图仪,对地表红层(三叠系红色砂岩)褪色及粘土矿物丰度增高现象进行探测,编制褪色岩相图,与里斯本油田有良好的对应性。

米振海(1988—1990)在新疆三台北油气田的工作也是一个很好的实例。作者主要利用陆地卫星TM图像,航空多波段扫描仪及地表化探技术,对三台油气区进行研究,结果表明航空多波段扫描数据得出的遥感油气异常与已知油田的吻合程度较好。

另外,油气田的气态烃(丙烷、丁烷,扩散外逸,会在油气田上方形成一种色调浅而亮的雾状异常,美国埃森石油公司在安纳达科油气田沉积盆地进行了解译判别,解译了二组图像;第一组图像上发现了35处雾状异常,其中有33处与现有地下构造和油气田相符;另一组图像上有57处雾状异常,其中有42处与已知油气田相符。

五、植物的变异现象

由于成矿地段的地球化学异常,植物或植物群落往往会引起生态变异,主要表现为:
①出现特殊的植物种属。矿化引起局部地段一些元素的富集,出现一些所谓的指示植物,如我国长江中下游一些铜矿区的“铜草”。有些富含铜的土壤区,红松发育很好,而别的植物

表 9-2 常见蚀变岩色调特征

蚀变岩	硅化	黄铁矿	砂卡岩	铁帽	高岭土	角岩	大理岩	方解石	粘土	云母
真彩色	暗绿	深暗色	红色	紫红色	灰白色	暗黑色	灰白色	灰白色	淡黄淡青色	
彩红外	暗紫	暗紫黄	金黄色	深黄色	浅灰色	深灰色	灰白色	灰白色	浅黄色	

(据楼性满)

则枯死。而土壤中铀元素富集, 则苦艾等叶状植物生长茂盛, 其它植物很少生长。③植物生长密度异常, 有些元素会使某种植物生长异常茂盛, 另一方面, 含矿地段的某些元素也可

使植物“中毒”而造成枯萎或死亡, 造成“林窗”或“秃斑”。如硫化物矿床、放射性元素矿床和铬镍等金属含量高的地区, 对植物均有毒害作用。煤矿自燃造成温度太高而使地表植物枯萎。如苏联雅库特含金刚石金伯利岩筒上生长有特别茂盛异常高大的赤杨、落叶松等, 成为识别金伯利岩筒的一个标志。③植物生态异常。前面二种现象毕竟是较为少见的, 大部分情况往往是造成生态变异, 引起植被光谱反应上的差异, 从而在遥感图像上表现出来。约斯特和温德罗斯测量了生长在矿体(铜-钼矿带)上和非矿化区正常土壤上红云杉和胶枞的反射率(图9-3), 二者光谱曲线明显不同, 特别是近红外区的反射率变化更大。运用遥感资料可以很快地圈定植物异常的分布, 从而用以指示找矿, 如委内瑞拉利用航空遥感资料分析地面植物分布特征, 从而寻找到储量达5亿吨的铁矿。

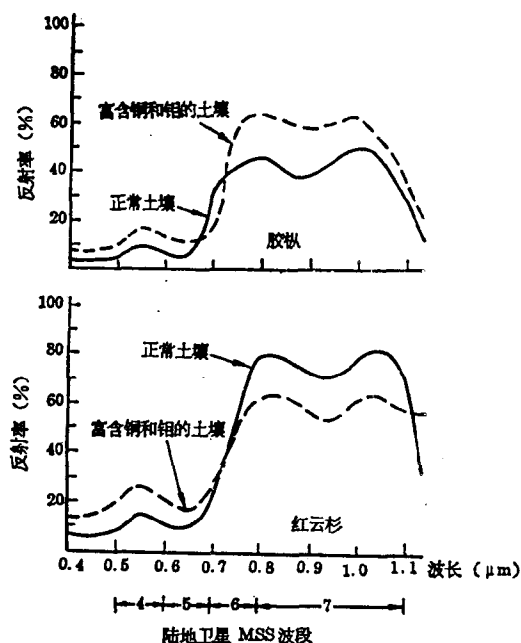


图 9-3 生长在正常土壤和生长在富含Cu、Mo的土壤上的胶枞和红云杉的反射光谱曲线
(据Yost和Wenderoth, 1971)

第二节 不同岩区成矿条件遥感研究

随着矿床学、区域成矿理论的发展, 对各种矿床类型的地质条件与成矿模式已了解的比较深入。不同的矿床类型, 其成矿条件不同, 从而在遥感图像上的信息特征也不同, 因而遥感找矿的技术方法和工作程序也有不同。下面简述岩浆、变质、沉积、表生四种基本成因类型矿床的遥感特征及其研究方法。

一、岩浆岩区矿床

主要是指在成因上及空间分布上与岩浆侵入活动及火山活动密切相关的矿床,尤其是内生金属矿床。这类矿床在遥感图像上往往与线性构造和环形构造有关,其构造、岩浆岩(火山岩)及围岩条件决定了矿床的产出部位,其控矿或导矿构造多为深层断裂带,而赋矿部位则在深断裂附近的派生断裂或裂隙内,或是深层断裂带与其它断裂的交汇处(图9-4),并常伴有环形构造(侵入体、火山岩或次火山岩的反映)存在及与矿化有关的围岩蚀变、矿化异常存在。如安徽铜陵地区,近东西向的深层断裂控制了岩浆活动和矿化作用,而矿床则产于多组次级断裂或裂隙的交汇区(南北向、北东向和北西向断裂与深断裂交汇,或深断裂附近该三组断裂的交汇区)。

遥感在寻找这类矿床时能在以上几个方面起作用:①识别其控矿、导矿构造;②进一步判断矿床的赋存部位,即次级断裂;③判别岩体或火山机构的位置,判明其规模及分布情况;④了解围岩情况,是否有利成矿;⑤查明围岩蚀变情况。

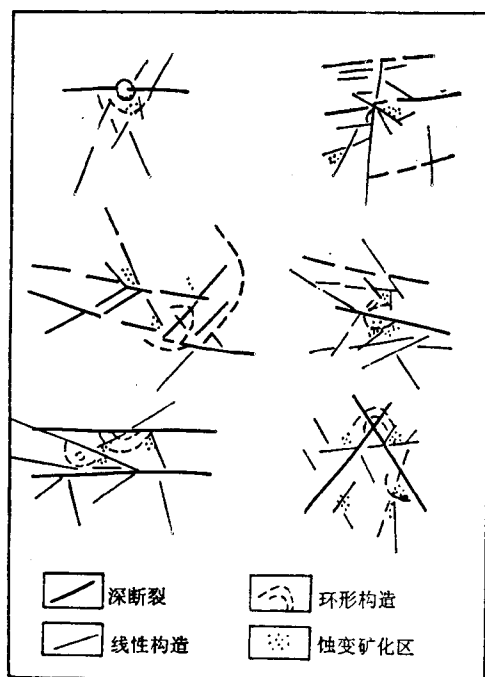


图 9-4 内生多金属矿床遥感图像的几种图式示意图

(据刘燕君, 1991)

析可进一步提高预测精度。

李恭等(1984)在赣南西华山—扬眉寺钨矿区的工作就是一个实例,针对工作区的情况,他们采用滤波、比值等图像处理方法,增强了线性构造、环形构造,为判明该区控矿、容矿构造提供了基础,通过对遥感图像的综合解译、分析、综合已有地质资料,认为遥感影像上环形构造基本是侵入岩体的反映,其与北东—北北东向、东西向、北西向线性构造交汇于环内,是指示岩浆侵位和控制矿田、矿床分布的影像标志。

金伯利岩虽然出露面积较小,但仍可用遥感方法预测成矿的有利地段,田宝忠(1980)在辽东半岛某地通过遥感影像的分析,得出金伯利岩的影像标志为:金伯利岩总体上赋存于深断裂旁侧多组断裂的交汇区,形成深色调的椭圆状环形影像,金伯利岩筒分布于环的边缘或环与环的交叉部位,呈明显的负地形。结合航磁、重砂、水系分

二、变质岩区矿床

在变质岩区,常规地质方法进行岩层划分、矿产预测均很困难。遥感技术的应用可深化对变质岩区矿床基础地质研究,深化对各种控矿因素的认识,为找矿提供重要线索。

在老变质岩区内,遥感影像对于圈定古老的侵入体、火山岩及古火山机构很有成效,在遥感影像上,往往以环形构造显示出来,如其产出于深大断裂带附近,并能确定其是火

山机构或侵入岩体的反映,则是重要的标志,是成矿有利地段。如张家口西部沿北西向断裂分布的晚侏罗—白垩统酸性次火山岩和火山机构,均与钼、铁、锌、锰及金矿床的形成密切相关。

对遥感图像上特定影纹结构和色调的解译,或通过合适的图像处理技术,如比值等,往往可以突出一些与成矿有关的信息,对找矿起重要的指导作用。变质岩区由于构造活动复杂,还应重视区内的构造叠加影像特征的分析,注意运用变质构造原理,探索含矿层的分布规律,从而指导找矿。

刘允良(1990)在冀东迁安地区古老变质岩系发育地区,利用遥感影像,以地质体波谱测试资料为基础,结合地质资料,通过图像处理和综合分析,对该区构造特征研究和找铁矿中起到了明显的作用。在分析波谱特性的基础上,选择了比值作为突出铁矿信息的手段,在MSS7/4、6/4和5/4合成的假彩色图像上,含铁变质岩系和铁矿层都呈明显的条纹条带,呈淡天蓝色斑纹,成为一种特征的影纹。这种影纹可分为三种:一是组成一个环形构造的条带状纹形;二是在该环四周的斜“S”型和“U”型环带状纹形,它们是含铁变质岩系紧密褶曲的形态特征;三是以紧密细小弯曲表现的蠕虫状环带纹形。这三种条带纹型影像是叠加在一起的,显示了含铁变质岩系是多期变质作用和多期构造变动叠加形成的。从而总结出该区变质铁矿层的分布规律,圈定了一些远景区。

三、沉积岩区矿床

此类矿床主要受某些岩性-地层的控制,而含矿岩系在卫片上难以显示,因此多以航空遥感作为主要的研究手段,航天资料用来了解区域构造的控制作用。

此类矿床在高分辨率航片上,矿层往往可以直接显示出来,如非金属矿石灰岩、石膏、煤层等,岩层本身也就是矿体。但在沉积岩中局部富集的金属矿床,岩层并不等于矿体,在遥感图像上一般仅能识别岩层,是否是矿体需要更多的地质工作来确定。

层状的岩层或含矿层的产状,在航片上一般可以大致确认,尤其是在基岩露头零星的地区,遥感更能全面而准确地调查其分布,通过对金矿层的追踪,将其圈定出来,从而确定新的找矿远景地段。

四、表壳矿床

此类矿床主要有近代风化壳矿床和砂矿,地貌是这两类矿床的直接控制因素,组成矿床的物质是化学性质较稳定的元素和矿物,如金、锰、铝等矿床。

现代风化壳中的残余矿床,多位于较稳定的准平原化的高平台(古夷平面)地形上,有时也可见于凹地、破碎带或岩溶洼地中。砂矿之最有利的地貌条件是低山丘陵的河谷区和海滨区,对砂矿床有利成矿地段圈定主要取决于地质构造和地貌的正确解译。

无论是风化残积矿床,还是砂矿床的形成均受表生风化作用的控制,含矿地质体的风化、搬运和堆积的规律及其矿床赋存部位均与地貌发育阶段相适应,并与一定的地貌部位相一致。只要搞清了它们的成矿规律,不难在遥感图像上根据地貌特征识别矿床的部位及分布规律。以砂金矿为例,其形成的先决条件是有充分的原生金矿作为砂金的来源,同时,它的富集受区域地质构造、地貌和第四系发育规律的控制。河流地貌的解译是非常重要的,一般来说,流水速度变慢的部位,均是砂金富集之处,如心滩、支流与主流交汇处等。

第三节 遥感资料综合分析用于找矿

应用遥感与地质资料进行综合分析、预测区域成矿远景等已取得很多成果。特别是随着计算机技术应用的日益广泛,数字图像处理的日益发展,遥感资料的综合分析已变得越来越重要。遥感资料综合分析的方法有二个方面:一是研究遥感影像上线、环构造与区域矿产分布及成矿的关系,认识成矿规律并圈定找矿远景地段。其二是通过多波段,多种方法的遥感图像增强处理,综合分析,提取与矿化有关的信息,从而为成矿预测提供有用资料。

一、线性构造及与成矿的关系

大量研究表明,绝大多数遥感影像线性构造反映的是构造应力作用下的岩石形变带、软弱带或应力集中带,它们往往成为导矿与容矿的场所,还可能是某些成矿沉积盆地边界的控制因素,如对油气藏的圈闭等。通过对影像线性构造的综合分析,可以进一步了解区域成矿规律,从而进一步明确找矿方向。

1. 影像线性构造级别和矿产的关系

不同级别的线性构造与成矿的关系是不同的,一般来说,巨型断裂带、深大断裂往往控制着矿田或成矿带的位置,有工业远景的矿床却分布在与这些主干断裂斜交或平行的次级断裂和节理带中。

萨福诺夫和帕尔费诺夫详细研究了中亚地区矿田和矿床构造、岩浆的控制因素,分析了中亚一些最重要含矿区的地貌构造模式,与天山构造一致的、限定巨大地貌形态的近东西向逆掩型断裂系统带、横向的穿透性断裂系统,控制着本区晚海西期亚碱性花岗岩-花岗闪长岩的分布,而稀有金属矿化作用与这些侵入体直接相关,而次级的北东和北西向线性构造则控制着局部分布的亚碱性、酸性和碱基性成分的岩浆建造,许多情况下,这些线性构造具有形成锑-汞矿化、稀有金属矿化、稀土元素矿化和萤石矿化的专属性特点,控制着矿产的分布。

除线性构造的级别外,还应注意其构造活动时期对成矿作用的影响,成矿前的线性构造可成为导矿通道或容矿场所,而后期活动的线性构造则会破坏已形成的矿床。

2. 构造部位对成矿的影响

岩浆最容易沿着大型剪切带侵入到扩容拐点区内(剪切应力场的拉张区),这种岩浆活动往往伴随有矿化作用。蒙特罗索金矿床是西班牙西北部较大的金矿床之一,位于一条右行断裂带的拐点——雁行断层间断点之上。该区断裂的右行剪切和热液活动同时发展,断裂活动造成的扩容性拐点成为岩浆活动的中心,这类地方可作为高远景成矿靶区,因此,通过遥感图像解译分析,寻找这些拐点具有重要意义。

3. 线性构造成矿条件分析

通过对遥感影像的解译分析,作出遥感影像线性构造图,同时与已知的地质矿产资料进行对比分析,分析线性构造与矿产在空间上的关系,从而提出进一步找矿的方向。

美国加利福尼亚海岸山脉地区,约有100个汞矿床(点)聚集在21个地段,过去对其成矿条件一直未搞清楚,经卫星图像解译后,在该区发现了许多北西西走向的断裂,它们

是圣安德烈斯断层系的剪切断裂,并且判明圣安德烈斯断裂是导矿构造,而北西西向断裂是容矿构造,查明了汞矿的成矿条件,为该区寻找新的汞矿床提供了线索。

4. 线性构造统计分析在找矿中的应用

影像线性构造研究的一个重要进展是线性构造的统计分析,通过统计分析,可以揭示线性构造空间分布的某些统计特征,有助于分析构造异常与矿化、石油储集、古火山机构等之间的关系,如雷清夏(1984)对陕西小秦岭黄龙铺地区的线性构造进行统计分析,发现主要统计特征与已知矿床(点)、岩体等有很好的对应关系,为预测有利矿化部位提供了线索。

研究表明,在线性构造诸多统计特征中,与矿产关系较为密切的主要有线性构造的密度和交点密度,大多数情况下,矿床位于影像线性构造的相对高密度区和交点的高密度区。王润生等在安徽铜陵地区的航天、航空图像进行线性构造的计算机自动提取和目视解译,作了南北、东西、北东和北西向线性构造的定向密度图,研究不同方位线性构造的控矿作用。结果表明,南北和东西向二组线性构造的密度图(图9-5)上,高密度区与已知的铜官山、狮子山、新桥三个矿区相吻合,有很好的对应关系。图9-6是该区线性构造交点统计结果,同样表现出良好的一致性,高值区与已知矿区吻合很好,为该区成矿远景预测提供了线索。

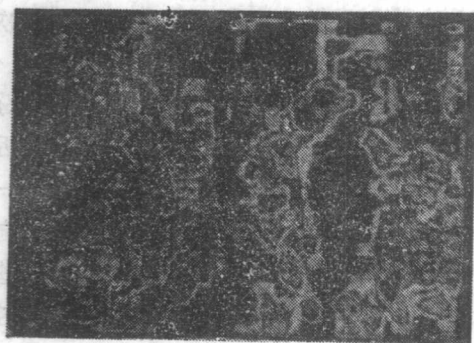


图 9-5 线性构造密度图

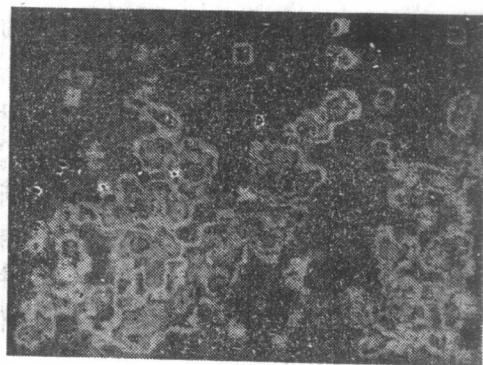


图 9-6 线性构造交点密度图

二、环形构造影像及与成矿的关系

影像环形构造自从由航天遥感图像中被发现以来,由于其与矿产的密切关系,日益引起人们的重视。据统计,我国铬、镍、金、铁、铜、钼、钨、锡等主要内生金属矿产,有91%分别与2000多个大小不等的环有关,如表9-3所示。与矿产形成关系密切的影像环形构造往往与构造-岩浆成因有关,不同的成因有不同的找矿意义。

与垂直构造运动有关的负向环形体,是由地壳局部沉降形成的圆形凹陷和构造盆地,较大型的在地球物理场上会有反映,如重力低等,这类环形体往往与沉积矿产和石油的赋存有关,我国的不少油田分布在大-巨型负向环形体的内缘。

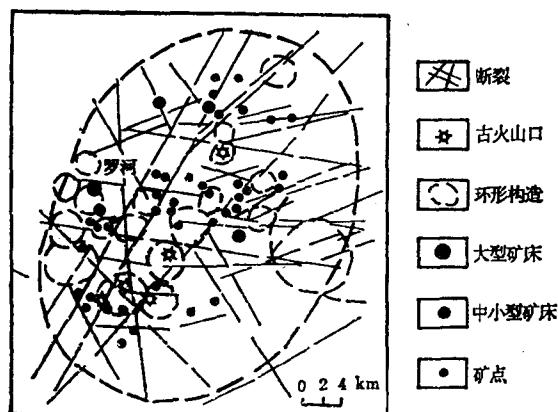
与火山作用有关的环形体通常规模小但成群出现,呈叠环、并列、寄生等组合形态,矿产往往赋存于环体边缘或体内,如安徽庐枞地区火山盆地在图像上显示的环形体及矿床分布(图9-7)。

与岩浆侵入活动有关的环形体则往往与内生金属矿产有关,由于岩浆侵入而引起的围

表 9-3 我国内生矿产与环形影像相关统计表

矿 产 分 布	矿产数		环的级别				环形成时期			环的形态与成因类型					矿床所在位置					
	矿产总数	与 环 形 有 关 者	II 级	III 级	IV 级	V 与 VI 级	前 古 生 代	中 古 生 代	中 新 生 代	正 地 形 环	负 地 形 环	火 成 岩 环	褶 皱 — 活 动 环	褶 曲 — 断 裂 环	环 边	环 中 心	环 — 环 交 汇 带	环 外 线	环 — 线 交 汇 处	环 内 线
铬矿	49	48	11	20	11	3	14	19	15	13	6	21	7	1	41	6	4	13	11	17
镍矿	36	35	3	18	11	3	24	8	3	15	3	8	8	1	27	7	0	12	9	10
钽铌磁铁矿	8	8	1	6	1	0	8	0	0	8	0	0	0	1	8	1	0	0	4	1
矽卡岩铁矿	172	160	30	51	70	9	115	17	28	70	10	36	34	10	150	10	20	57	27	7
火山气液铁矿	73	65	17	17	23	8	24	31	10	15	7	26	11	3	41	14	1	4	5	15
火山气液铜矿	115	100	10	40	44	6	36	36	28	35	6	30	18	10	88	13	3	15	9	12
矽卡岩铜矿	76	70	18	26	16	10	52	13	5	20	1	12	27	10	70	0	3	6	10	10
斑岩铜矿	45	43	6	15	16	6	20	8	5	16	5	9	12	1	35	3	4	10	15	10
钼矿	60	60	15	20	19	6	32	20	8	20	0	35	5	0	50	3	7	7	10	8
金矿	121	120	13	63	39	5	9	20	10	48	5	25	31	11	100	30	10	1	12	11
钨矿	100	100	19	43	30	8	7	25	5	22	0	10	66	2	60	30	3	1	8	4
锡矿	45	40	7	23	9	1	27	5	8	5	1	15	14	5	35	5	5	1	7	3
铋矿	45	40	5	1	33	1	35	5	0	12	0	0	25	3	20	20	0	1	2	6
汞矿	55	50	13	17	19	1	45	4	1	31	9	0	5	5	10	45	6	1	2	35
合 计	1000	909	168	360	344	67	592	211	126	330	50	227	266	64	770	152	66	130	131	140

(据刘燕君, 1991)

图 9-7 庐纵地区环形构造与矿产关系
(据王道经)

岩蚀变常使环体边界模糊。如安徽铜陵地区在图像上显示为一边界模糊的多层环形影像, 矿体主要赋存于内部小型环形体的边缘。

影像线性体和环形体彼此之间往往存在互为依存的关系或构造复合关系。如某些环形体定向直线排列表现为线性体, 前者反映的可能是火山机构或侵入体, 后者反映的是基底断裂。在某些条件下, 岩体可能是成矿母岩, 而断裂是成矿溶液及岩浆的有利通道。

有时线、环体独立并存, 但两者交汇、切线接触等, 具有复合关系。许多资料表明, 线、环体的交切部位可能是内生金属矿化、富集的有利地段。

遥感图像上色调异常、线性构造、环形构造的组合特征的解译, 并研究其与矿田构造的基本要素(成矿岩体、控矿构造和围岩蚀变)的关系, 从而建立由线、环、色斑异常组成的遥感矿田模式, 从而指导找矿, 有关这方面的详细内部见书中有关章节。

三、多波谱遥感资料的矿化蚀变信息提取

蚀变是许多矿的重要成矿标志。遥感资料的多波谱的特点, 如美国陆地卫星从MSS

四个波段改进为TM的七个波段，特别是新增加的对蚀变矿物有效的TM7短波红外波段及TM6热红外波段，使用图像处理来提取矿化蚀变信息提供重要技术保证。

TM资料可识别的蚀变矿物可分为三类：①铁的氧化物、氢氧化物和硫酸盐，包括褐铁矿、赤铁矿、针铁矿和黄钾铁矾。这些矿物的波谱特征如图9-1。②羟基矿物，包括粘土矿物和云母。③水合硫酸盐矿物（石膏和明矾石）和硫酸盐矿物（方解石和白云岩等）。这几类蚀变矿物都有自己独特的波谱特征（图9-1，9-2）。铁的氧化物、氢氧化物和硫酸盐在TM1，2，3波段反射比曲线上升梯度很陡，TM4波段附近有一个较强吸收带。含羟基矿物在TM7存在强烈吸收谷，是许多蚀变矿物的重要波谱特征。

对矿化蚀变信息的提取的图像处理最常用的一种方法是彩色合成。含①类蚀变矿物的岩石在真彩色合成（TM321）图像上呈暗红或暗紫红色。褐铁矿在TM542或TM543合成图像上，为褐红色。含②③类蚀变矿物的岩石在TM432合成图像上为黄色，TM571图像上为红或青色。

另一种较常用提取矿化蚀变信息的图像处理技术是比值合成：①TM3/1，用于识别铁的氧化物、氢氧化物类，包括赤铁矿、褐铁矿及针铁矿；②TM5/4，在此比值图上，云母和黄钾铁矾的值远大于1，而明矾石和石膏的值远小于1，方解石和粘土矿物类接近于1；③TM5/7，识别含羟基矿物、水合硫酸盐和碳酸盐，这类矿物在此比值图像上呈亮色调，其值远大于1，但需注意，植被在此比值图上也很有亮，需要用别的方法加以区分，如用TM4/3，植被的TM4/3值很大，而这类矿物的TM4/3比值较小（ ≤ 1 ）。

在TM5/7（红）、TM3/1（绿）和TM3/4（蓝）进行彩色合成的图像上，赤铁矿和针铁矿化呈绿至青色，黄钾铁矾呈黄白色，含羟基矿物、水合硫酸盐化岩石呈品红色。

由于地质条件的多样性，在实际工作中往往需根据具体情况选择方法，除比值法外，还可选择主组分变换等方法来进行处理。

美国内华达州金场（Goldfield）地区是著名的金和多金属产地。美国地质调查局1974、1979两次作了热液蚀变制图。渐新世开始的粗面岩、石英安粗岩喷发，发育有少数破火山口及环状裂隙。热液蚀变主要存在于中新世第二期的安山岩及英安岩。后来的穹状隆起与剥蚀作用使火山中心及矿体出露地面。蚀变岩呈环状，面积约40km²。矿体主要在金场城西南，面积约2km²（图9-8）。金场地区的蚀变模型是：中部为含矿的硅化带，向外是泥化带。泥化带包括明矾石高岭石亚带，伊利石高岭石亚带和石亚带（自内向外），最外侧则是青磐化带。

1974年Roman等人用MSS对蚀变岩（284个样），未蚀变岩（342个样）的地物波谱测试的结果，得出：①蚀变岩有较高的反射比。②蚀变岩在2.2μm的最低值区是粘土、明矾石等蚀变矿物引起的。③因而，再用蚀变与未蚀变岩石反射波谱曲线的最大与最小波段的MSS比值（1.6μm/2.2μm），图像将为蚀变岩识别提供依据。并通过4/5（蓝）、5/6（黄）、6/7（品红）的彩色合成图像，把粘土化硅化带及褐铁矿化蚀变区显示出来。

NASA用1984年10月4日 Landsat4的TM7个波段遥感资料，对金场地区深入研究。图9-8是1.4—2.5μm波段的几种主要蚀变矿物的波谱曲线。根据这些曲线特征，选择了比值、比值彩色合成，主组分变换，集群分类等方法对该区的TM图像进行了处理。图版61是TM5/7比值图像，其上高比值即浅色调是蚀变岩的反映，而未蚀变的岩石，在TM5和TM7波段的值近于相等，因而比值接近于1，从而相对较暗。TM3/1比值图像，反映了氧

化铁类蚀变矿物,较亮的是蚀变矿物和铁帽,其余的较暗。使用TM5/7(红)、TM3/1(绿)和TM3/5(蓝)合成,则橙色调和黄色调分别代表了蚀变外带和内带,图版15很好地展示了蚀变带的分布,其范围与地质图非常一致。

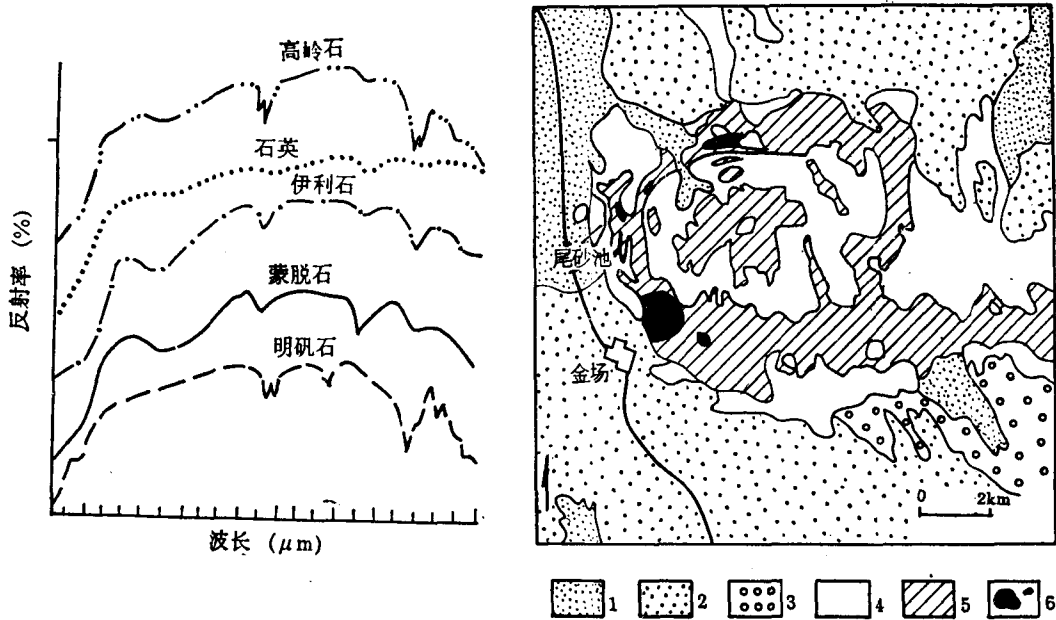


图 9-8 美国金场地区主要蚀变矿物的反射波谱曲线
(引自Sabin, 1986)

图 9-9 美国金场地区地质图
(引自Sabin, 1986)
1.第四系; 2.成矿前火山岩; 3.凝灰岩;
4.未蚀变基岩; 5.热液蚀变岩; 6.矿床

主成份分析的第二分量中,亮色调与蚀变的分布很一致(图版62),这是由于TM5波段在PC2中有很大的相系数。

对TM六个波段(不用TM6波段)数据进行集群分析,结果如图版16,蚀变岩被分为二类,以红色和橙色表示,野外调查表明,由计算机分类的结果是正确的。

研究表明,Goldfield地区的热液蚀变通过TM图像处理技术可以成功地进行识别,为该区寻找斑岩铜矿提供了依据,指明了找矿方向。研究者在引入与斑岩铜矿有关的热液蚀变模式的基础上,正确选择热液蚀变信息作为卫星遥感找矿的重要标志;在波谱资料分析的基础上,正确选择图像处理方法,增强蚀变信息,是保证这个研究取得成功的关键,也是值得我们借鉴的。

Robert, W.M.等人(1986)在新墨西哥西南部blue Greek盆地内热液蚀变填图中使用TM5/7进行粘土、云母等含羟基矿物的矿化蚀变区进行圈定。研究使用TM图像进行,主要用TM5/7波段比值进行圈定。进行波段比值之前,先进行了噪声消除(去条带)和几何投影校正,同时还进行了数据的大气校正。为了消除植被的影响,发展了一种植被掩模技术,将TM432波段合成的假彩色图像进行ISH变换,由于植被的鲜红色,因而在色度图像上很容易确定下来,就研究区而言,其值在130—160之间,掩模是含植被像元取0值,其它取1而产生,将TM5和TM7波段与掩模相乘产生的图像,所有植被像元为黑色,其它像

元保持不变，然后进行比值，这一结果与原来用详细野外信息和辐射测量资料得到的用于识别羟基异常的矿物吸收指数（粘土）相比，两者非常一致。表明在半干旱地区，用TM数据圈定与浅成热液矿床有关的蚀变带是完全可能的。

这二个利用TM图像成功圈定蚀变带的例子，显示了TM图像的优点，这成功很大程度上是由于TM7波段正好反映了许多蚀变岩的吸收特征，但TM图像的高分辨率和高光谱分辨率也是一个方面，这也显示了，随着遥感技术的发展和应用水平的提高，作为矿产资源勘查的重要手段，遥感和图像处理技术正在显示出其巨大的潜力。

第十章 多时相遥感资料

地学动态分析

及时、准确地查明地表景观的动态变化,对当前国家经济建设的规划决策、日益严峻的环境问题的评价与治理以及危及人类生存的各种自然灾害的监测和防治等都是至关重要和不可缺少的。而遥感在获取此类动态信息上恰恰有其它手段无法比拟的优势。正如陈述彭教授(1985)所指出:“动态信息正是遥感技术的特长。……用遥感去揭示其它手段难以发现的动态规律,使遥感在经济建设决策中愈来愈发挥它的作用,这是历史的必然。”

遥感揭示动态信息的基本途径就是多时相遥感资料的地学动态分析。它是随着遥感手段越来越多样化,多平台、多种覆盖周期,尤其是各种不同时间分辨率的卫星成像系统相继使用,取得多时相遥感信息已越来越成为现实可能的情况下迅速发展起来的一项新技术。鉴于它在经济建设决策中具有重要的现实意义,并有显著的社会经济效益,近年来已成为遥感地质领域内一个引人注目的研究方向。本章着重介绍它的基本方法原理和一些卓有成效的应用实例。

第一节 遥感地学动态分析的方法原理

一、遥感地学动态信息的类型

地学动态变化,在作用过程上,既有地质、地貌、水文、气象以及生态等自然过程,也有人类活动造成的人为过程;在空间上,从全球性的到一个局部地域的,呈现为各种不同的规模;在时间上,从缓慢渐变的到突发灾变的,表现有不同的尺度。各种过程又互为影响,错综交织。显然,对不同的动态对象和研究目标,用以分析的具体遥感手段和方法应是不同的。通常要根据不同种类遥感资料所能揭示的地学动态信息的类型来选定。既要考虑动态对象的时间尺度、空间规模,也要考虑遥感信息源的时间分辨率和空间分辨率。

陈述彭教授(1985,1990)按时间尺度把遥感地学动态信息划分为超短期、短期、中期、长期和超长期五类,并详细讨论了各类动态信息的特点和遥感分析方法,对推动我国遥感地学动态研究有理论指导意义。考虑到超短期和短期动态对象在遥感手段的选择和分析方法的使用上比较相似,为了阐述上的方便,我们将其归并在一起讨论。现分叙如下:

(一)超短—短期动态

表现为一日或数日内的变化,通常以小时为单位。既有和缓渐变性的,如天气变化、波浪潮汐等;而更多的是突发灾变性的,如热带风暴、山洪爆发、火山喷发、地震灾情、山崩、滑坡、泥石流、森林火灾以及恶性的环境污染事件等等。前者一般利用气象卫星数据,作常规的定时分析即可;对于后者,往往需作实时监测,包括动用机动的应急遥感手段,如即时进行的航空摄影,气象雷达等。同时加密监视NOAA等气象卫星影像,及时作出监测和预报。

（二）中期性动态

多为一年之内的变化，尤其是与季节变化关联的动态过程，通常以旬、月或季为单位。如农作物、森林、草场的季节变化（季历），河、湖、冰雪等水资源（包括水域环境）的季节变化以及旱涝变化，环境污染，较大尺度的大气—海洋动态过程等。一般可通过陆地卫星系列、海洋卫星系列的遥感资料，兼用气象卫星图像，逐月或逐季地对比。有时（如水稻、小麦等农作物估产，森林、草场资源调查）也要用航空遥感资料作补充，尤其是典型样区的实况调查资料。

（三）长期性动态

需经若干年才显示出变化结果，以年为单位。如河流迁徙，湖泊消长，海岸冲淤，河口三角洲伸展，沙漠化及沙丘的移动固定，冰川进退，城市扩展，土地利用现状变更以及港口、道路等交通设施的变化等等。一般要通过较长时间间隔（不同年份）的卫星、航空各种遥感资料的对比分析，查明其变化过程、轨迹及其量值、规模。

（四）超长期动态

指经历几百、几千年甚至新生代以来更长时间的地学过程，一般要通过留下的“遗迹”确定其存在并恢复其变迁史。如古河道，古岸线，古滑坡—泥石流，古湖泊水网，古文化考古遗迹以及新生代以来的构造运动、古火山、古冰川遗迹等。通常从一次性的卫星影像或航空像片上就可以判读出这些自然历史遗迹，结合传统地学（包括年代学）资料，来推断它们的时序，演绎它们的发生发展过程。但利用多时相、多片种的遥感图像作对比分析，往往可获得更多的此类信息。

二、遥感地学动态分析的内容和工作程序

（一）遥感地学动态分析的任务、要求

多时相遥感资料地学动态分析，从根本上讲，是利用具有时间系列（不同时相）的遥感信息研究地球表面物质与能量的迁移规律及发展趋势。不同类型的地学动态分析企求达到的目标和宜采用的遥感手段及时相可以是千差万别的，但基本的任务、要求却是相似的，至少都要包括以下三项内容：

1. 快速检测出变化迹象信息。这是实现地学动态分析的前提。作为发展趋势和奋斗目标是实现地学动态的实时监测；
2. 给出动态变化的量值，包括每个时段内的变化量。通过具体的数据和图件，提供量化的概念；同时，还必须做到能方便地对原有数据实现更新；
3. 查明变化轨迹，总结变化规律，包括建立相应的地学的或数学的模型，乃至“再现”演变模式，预测未来的发展趋势。

（二）遥感地学动态分析的工作程序

从上述三项基本任务可见，遥感地学动态分析不仅首先要解决多时相遥感资料的来源和应用问题，还必须有相应的地学资料配合。其中，像变化迹象信息的检测、数据更新等，尤需已有的地学信息数据库的支持。因此，多时相遥感资料地学动态分析常常是与地理信息系统（GIS）紧密配合进行的，故通常采用图10-1所示的基本工作程序。总体上可划归为：①多时相遥感图像的选择；②图像的配准复合；③动态变化信息的检测和提取三个主要的工作环节。其中，图像的配准复合是多时相遥感地学动态分析赖以进行的基础，也是

关键性的工作环节，但它的方法原理在第四章和第十一章作介绍，故这里不再赘述。下面仅对①、③两个环节作简要分析。

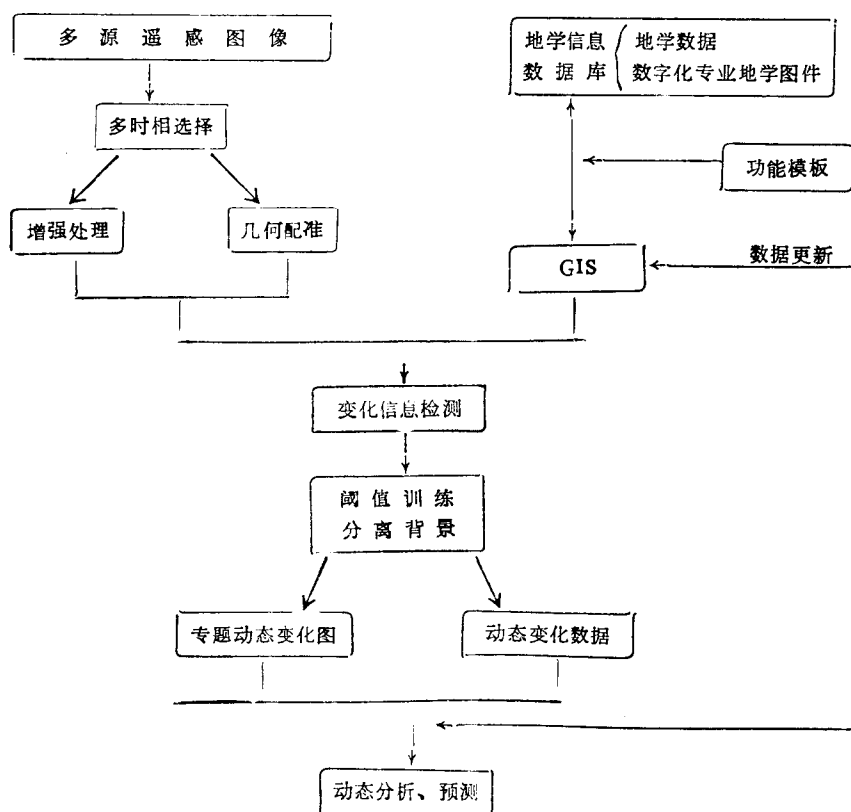


图 10-1 多时相遥感资料地学动态分析基本工作程序

(三) 多时相遥感图像的选择

遥感发展到今天，每个地区都可能有许多不同遥感器在不同时间摄制的遥感图像。随着时间的推移，时相将越来越丰富。因此，任何一项遥感地学动态分析任务首先遇到的就是如何选择满足任务要求的合适时相的遥感图像。

一般来说，时相的选择应按照具体的动态对象和期望目标，综合考虑时间分辨率、空间分辨率和波谱分辨率三项指标。例如，对于大尺度、快速变化的对象（台风、大范围洪涝灾害等），可主要采用空间分辨率低，但时间分辨率高的气象卫星图像；对中小尺度、变化并不很快，但要求较精确量值的对象（如土地利用、水土流失、河口三角洲伸展、城市扩展等等），则多采用资源卫星系列的图像（如TM、SPOT），有时还需要较大比例尺的航空像片作补充；有些动态对象，尤其涉及水体、植被者，需从不同波段的图像上获得不同内容的动态（如水陆界线和泥沙扩散），此时波谱分辨率（波段）也是必须考虑的选择因素。

在上述三项指标中，时间分辨率无疑是首选指标。不同遥感器的时间分辨率可参见第三章中的有关部分。这里要指出的是，由于天气条件、成像系统的工作状态、地面站的接受与存储条件等各种因素的影响，常出现遥感器虽过境但并无遥感数据的传输和记录的情

况,因此其时间分辨率只是表明最大可能的时相频率;另一方面,实际工作中,不同时相可取自不同遥感器的图像,各自有不同的时间分辨率,但常常也不是各自时间分辨率的叠加。总之,时间分辨率与时相频率并不是一回事,在时相选择时很大程度上取决于当时实际有的时相资料,而不单单是时间分辨率。

(四) 动态变化信息的检测与提取

地学动态分析的中心工作就是发现和检测出动态变化的事实,分析它的演进过程和预测它的未来趋势。从遥感图像上检测出地学动态信息一般有两个途径:

一是利用动态变化的“遗迹”,即历史分析法。例如,利用废弃河床、牛轭湖、迂回扇、决口扇等古河道形迹,分析平原河流改道迁徙的动态过程;根据海蚀崖、海蚀穴、海蚀平台以及贝壳堤、滨海扇、滨海湖沼洼地、古海塘等古海岸遗迹,推断海岸变迁;其他,如古湖泊、古冰川、古滑坡、古洪积扇,以及洪水淹没痕迹等等。在遥感图像上根据色调、阴影、几何形态和纹理结构、地貌表现等标志去一一进行判读,通过不同时相影像的目视解译编图,便能获得系统的动态变化信息及演变过程。

二是采用图像处理的影像相减法,获得差值图像,检测出单因素(专题)的动态变化信息。最简单的做法是将两个时相的原图像(数据)直接相减,对零值、正值、负值分别进行编码,进而作变化信息的显示和提取。但由于遥感影像数据受环境因素(如成像时刻的气象条件、地面的水份湿度、植物生长状况等)的影响甚大,即使两个时相的季节相同,也会因此而呈现不同的亮度水准。故采用原图像直接相减会包含有相当程度的伪变化信息。解决的办法,一是先对两个时相的图像作分类处理,然后再相减,即类后相减。由于此时的检测误差是两个分类图像误差之和,所以要求分类图像本身有较高的分类精度;另一是分别对检测对象作专题提取图,然后相减。由于背景被简化归并,目标突出,故可明显改善检测精度。影像相减法比较适用于背景条件简单、短一中时间尺度、且要求有具体变化量值的动态对象,如洪水淹没损失、水土流失程度、土地利用现状、城市扩展、林火过火面积等等。

最后,作为完整的地学动态分析,特别是在已建有地学信息数据库和空间信息系统的情况下,除上述三个工作环节外,还应包含数据更新的工作程序。一般来说,一个完善的空间信息系统均设计有数据更新的功能,并建立有与遥感数据沟通的接口。多时相遥感资料地学动态分析为建立地学数据的时间序列和快速、及时地实现地学数据的更新提供了方便和十分有利的条件。

第二节 多时相遥感资料地学动态分析的应用实例简介

随着卫星遥感技术日渐实用化,尤其是80年代中期以后,在我国相继建成了遥感卫星地面站和一大批气象卫星接收站,获得不同时相的遥感数据和图像越来越容易,给多时相遥感资料地学动态分析的发展带来极大的推动,日益引起许多科研和生产部门的兴趣和重视;至今已在热带风暴等灾害性天气的监测、预报,江、河、湖、海的动态变迁,地震、滑坡、泥石流、水土流失等地质灾害的调查,以及土地利用、农作物的长势监测与估产、森林火灾、城市扩展等各个领域作了广泛的试验和推广应用,取得了许多十分可喜的成果,其中利用气象卫星进行天气预报已是人们所熟知的遥感地学动态分析的成功范例。

本节仅从遥感分析方法和多时相资料选择的角度再介绍三个比较典型的动态领域的应用实例：

一、近期黄河口冲淤动态监测

黄河以泥沙量大称著于世，源源输往河口堆积，迅速改变河口区的海陆面貌，其动态变化具典型的地学研究意义，加上相继发现滨海油田，更促使人们对这一地区的关注和重视。因而黄河口便成了近年来遥感地学动态研究的热点，编制出版了一系列的研究文集和黄河三角洲动态演变图件。其中，范兆木等对近期黄河口冲淤的动态监测研究便是很有代表性的成功范例。现简要介绍这一成果。

今黄河口是1976年5月28日在西河口人工决堤，改道走清水沟东注莱州湾后形成的。作者选用决堤6天后的MSS图像代表原始面貌（图版11，再选取每年低潮位时经数字增强处理的陆地卫星图像作动态监测比较，直至1989年，共14个时相。图版12是1984年的影像，动态效果一目了然。动态分析方法主要采用目视解译编图：每个时相均解译出瞬时水边线位置，然后利用潮汐计算资料及潮滩坡度数据，归算到“黄海零米线”的位置；同时系统解译出各图像上黄河尾间的现势。二者套绘在一起，编出历年的亚三角洲演变过程图，并据以量算出每年海岸淤长面积和河长伸长数据（表10-1）。图10-2示意表示了1975—1986年间岸线的变化。由表10-1可见，14年间黄河口河长延伸33.6km，净造陆面积453km²，平均造陆率33.6平方公里/年，堪为世界沿海自然造陆速度之最。

表 10-1 黄河口历年流路河长和增长的面积

卫片种类	卫片时间	时 距 (年)	河 长 (km)	陆地面积 (km ²)	内 插 等时距化	陆地面积 (km ²)	备 注
MSS	1976.6.2		2.3	163	1976.12.31	190	量算的河 长与陆地 面积为 118°59'E 以东的河 长与陆地 面积 等时距化 的陆地面 积是由简 单的内插 算出。
MSS	1977.5.10	0.9	11.8	207	1977.12.31	262	
MSS	1978.3.12	0.8	13.8	286	1978.12.31	340	
MSS	1979.9.30	1.6	17.2	408	1979.12.31	407	
MSS	1980.7.14	0.8	20.4	406	1980.12.31	427	
MSS	1981.9.19	1.2	19.8	460	1981.12.31	465	
MSS	1982.10.31	1.2	19.8	478	1982.12.31	490	
MSS	1983.10.27	1.0	26.4	548	1983.12.31	550	
MSS	1984.10.5	0.9	27.8	560	1984.12.31	572	
TM	1985.11.25	1.2	30.4	615	1985.12.31	603	
TM	1986.6.5	0.5	27.0	549	1986.12.31	537	
TM	1987.5.7	0.9	26.7	530	1987.12.31	541	
TM	1988.12.3	1.6	29.8	557	1988.12.31	562	
TM	1989.11.20	1.0	35.9	616	1989.12.31	618	

（据范兆木，1992）

综合分析上述多时相遥感动态监测数据，作者查明人工改道后新亚三角洲经历了填湾摆动（1981年前）和向海突伸（1981年后）两大演变阶段。突伸阶段因相当一部分泥沙输往水下（图版12上清晰可见），故造陆率低于前期，只及其1/2。根据14年动态变化量值数据，作者还建立了黄河口海岸演变模型，预测未来发展趋势，给出了1990、1995、2000年黄河口亚三角洲形态预测图，推测至2000年118°59'以东地区将净增陆地面积287km²，并建议黄河尾间应于1997年局部改道北汉。

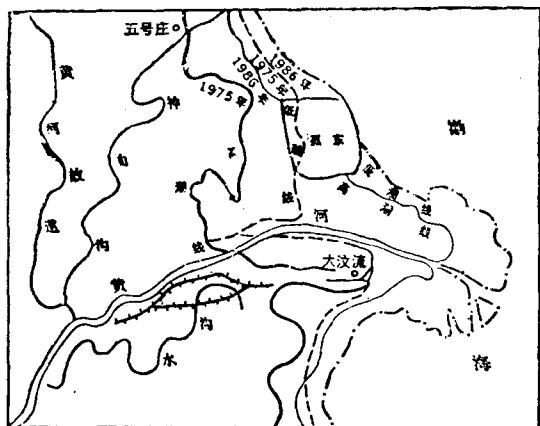


图 10-2 1975—1986年黄河口海岸变化示意图
(据许殿元, 1992)

显然, 上述分析和预测对黄河口地区近海油田的勘探规划、土地资源的开发利用, 以及港口、水利工程建设等一系列国土规划问题, 均具指导意义, 并提供了超前分析的依据。足见多时相遥感资料地学动态分析的深远意义。

二、岳阳市城市扩展动态检测

城市遥感是遥感地质为城市建设服务的一个新领域。其中城市扩展动态检测正是多时相遥感资料地学动态分析的优势所在。

岳阳市属中小城市, 根据其地域特点和资料条件, 分别选取了1978年的MSS数字图像、1984年航片和1987年的TM数字图像作城市扩展检测。采用的工作程序如图10-3。其中, 航片先通过目视解译编出土地利用现状图, 而后将其数字化, 与MSS和TM配准; MSS和TM则采用数字图像分类处理, 进行土地利用现状分类, 包括采用结构信息处理来提高分类精度。从中确定出城市边界和新、老城区的范围、面积等; 继而对三期图像作两两叠合相减(即类后相减处理), 得出1978—1984, 1984—1987的变化范围; 最后在微机对两期变化进行编码作彩色显示(图10-4), 并统计面积。结果查明该市1978—1984的六年间城区扩展了4.8km²; 而1984—1987仅三年内又扩展了3.0km²。说明城市扩展速度明显加快。

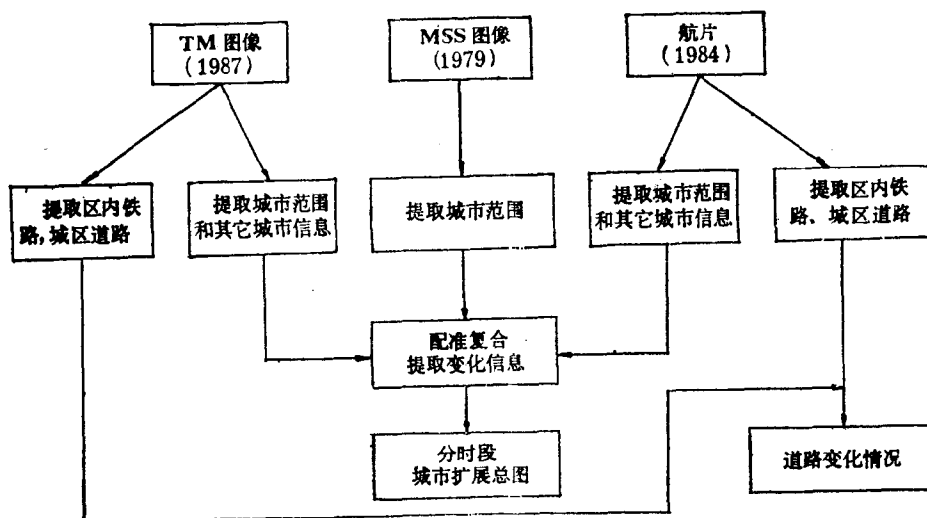


图 10-3 岳阳市遥感城市动态检测工作程序图
(据田良虎, 1989)

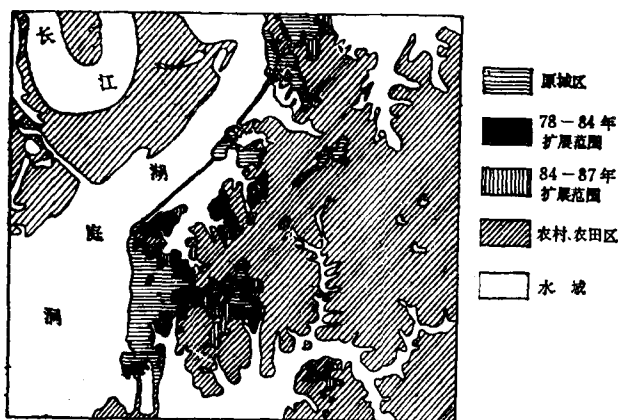


图 10-4 岳阳城市扩展图
(据田良虎, 1989)

三、气象卫星热红外图像的地震监测应用

长期以来, 遥感在地震研究中的作用主要是间接的地震地质背景的宏观定性分析, 而在每一次特定地震的预报中, 尚未能发挥重要的作用。强祖基等(1991)、侯常荣等(1992)发现许多强震震前及震后若干天内出现的地表增温异常迹象在 NOAA 等气象卫星的热红外图像上, 通过图像处理可以很好地被检测出来。

例如, 1990年2月9日17:57Z(世界时, 下同)江苏常熟发生的5.1级地震, 早在2月1日(震前8天)05:07Z的黄海海区NOAA四通道(热红外)的伪彩色图像(图版10)上即已发现, 35°N附近, 121°—122°E之间清晰可见有一个呈孤立块状的海面温度异常增温区(图中呈褐色者), 比外围边缘的海区温度高出约3—5°C, 面积约5万平方公里。之后, 异常区不断南移, 面积也不断扩大, 及至8日20:32Z的热红外图像, 增温区已移到长江口外海和杭州湾东侧海面, 面积已达15万多平方公里。次日便在紧靠黄海不远的常熟东面发生了这次地震。从气象观测资料中也发现, 90年2月上旬距震中400km内的各大气象台站测到的日平均气温都呈持续稳定的上升趋势, 并影响波及到5.5km高空的大气层。过程增温达9—12°C, 平均每天增温1°C或更多, 临震前一天增温达2—5°C。这种突发性的增温现象, 平时是没有的, 如在无震的1989年, 同期各台站的日平均气温则呈上下波动, 而非稳定型增温。我国地震工作者根据NOAA气象卫星热红外图像上捕捉、监测到的这一异常增温迹象, 在2月6日(震前3天)即发出在南黄海、苏北沿海将发生5—6级地震的预报, 结果获得了成功。

又如, 1990年6月14日中苏边境斋桑泊7.3级地震, 震前7天的NOAA热红外图像上, 从震中区南部沿斋桑泊NWW方向出现长1600km、宽约200km的热异常区; 震后, 6月17日的NOAA图像上局部地点仍维持一定的增温(如木斯套山区有4°C的异常); 1990年9月28日该区中国一侧发生的5.4级强余震, 震前3天也发现斋桑泊两侧沿NWW方向出现宽约200km、似纺锤状的地温异常区。类似的震前“岛状”地温增温异常也在1991年3月26日山西大同地区5.8级地震及其他许多地震期间的NOAA热红外图像上被监测到。

气象卫星的热红外图像是地表温度场(热辐射强度)的实况记录。目前由NOAA热红外通道的数据反算地面温度, 在方法上已比较成熟, 大致可达到海洋0.5°C、陆地1°C的精度, 足以检测出地震活动造成的4—6°C的“岛状”地温异常; 并可通过数字图像处理, 作多通道数据的彩色合成等, 以与背景明显区别的彩色异常在屏幕或像片上清晰地显示出来。气象卫星尽管地面分辨率不高, 但覆盖范围大、时间分辨率高, 对于快速、及时地捕捉震前增温异常的时空动态变化能发挥其明显的优势。因此, 多时相气象卫星资料的动态监测已引起地震部门的极大重视, 正在发展成为临震预报的一种新方法。

第十一章 多源地学信息复合

资料的地质应用

第一节 多源地学信息的复合处理

一、多源地学信息复合的涵义、目的与内容

遥感地质工作（如区域成矿预测）常把各种地质资料（如分析、测量、化验的数据，平面与剖面地质图件），凭经验、靠人脑进行对比和综合分析。这时常遇到：①使用的图件或图像的比例尺、地区范围、甚至地理坐标系统的不同；②使用的图像缺少经纬网及地名等必要的地理信息资料；③单一图像（如MSS）、图件（如地震、航磁资料）可靠程度差，或有多解性；④靠人的经验对多种资料进行综合分析，有顾此失彼及较多主观因素渗入的弊病。为提高地质解译与综合分析的效果与效率，把大量图件、图像、数据与人脑的认识思维活动建立起联系，取长补短，互为补充，从80年代初国内外迅速发展起一项以数字图像处理技术为基础，综合计算机、数字信号处理、多元统计分析、遥感地质、数学地质等资料知识的地质信息处理的新技术——多源地学信息数字图像综合处理技术。综合处理包括复合（Integration，拟合）、叠合（Overlay，叠和）两种处理形式。

复合处理是指把两种或两种以上地域范围相同，与地学有关的（遥感和非遥感）信息配准复合，在统一地理坐标系统与统一量纲下，组成一组（或一幅）新的空间信息（或图像）。叠合与复合不同，叠合处理只是在一幅（遥感）图像上叠加一些象经纬网、地名、地质构造和矿产等符号与标志。

多源地学信息数字图像综合处理技术是一项比遥感数字图像处理内容更为丰富的新技术方法体系，该体系与有关学科的关系如下式所示（全国遥感地质工作协调小组办公室，1991）：

$$MDIP \subseteq (DP \cap MG) \cup (DP \cap GC) \cup (DP \cup GP) \cup X$$

DP——数字图像处理学知识集合

MG——地质学知识集合

GC——地球化学知识学集合

GP——地球物理学知识学集合

X——其他相关知识集合

二、多源地学信息复合处理工作步骤

其工作步骤随工作目的与研究内容不同而异，主要包括：①多源信息资料的空间配准；②多源信息资料的内容复合或叠合。在复合处理基础上通过目视解译或计算机处理来提取有关地学信息。

图11-1是以航放为主的多源地学信息综合处理步骤。

多源地学信息空间配准是地学信息复合工作前对数据资料的预处理。其目的是：①把

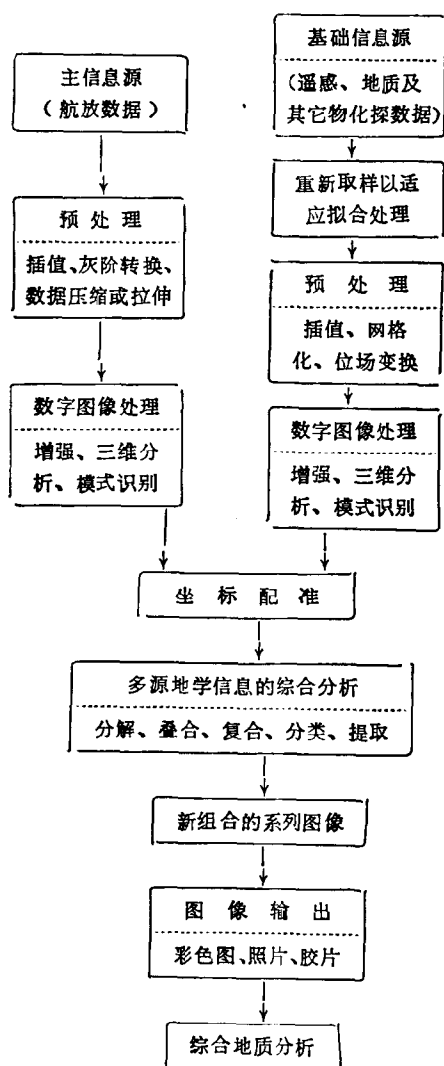


图 11-1 以航放为主的多源地学信息数字图像综合处理过程

(据刘德长, 1991)

参加复合的各种变量通过处理使之具有统一的量纲; ②把所有的数据文件(及图像)的几何坐标进行处理, 使之成为可以进行计算机处理的磁盘数据文件。为此, 需进行下列工作:

(一) 数据的数字化、网格化与编码

处理的第一步就是把参与复合的各种数据资料变成具有统一量纲的地学数据集。由于数据资料的来源多样, 获得它们的方式也不相同: ①象TM、MSS、SPOT等卫星遥感图像数据可以以磁带输入。②对已建立数据库的资料可从库中检索。③通过微机通讯, 将软盘上记录的物化探原始数据文件进行传输。④对图件则需要进行数字化, 包括: a. 对象原生晕等地球化学取样那样的离散数据, 通常用移动窗口求均值方法取值; b. 对航磁(剖面)数据则要沿测线圆滑后按规定间距载取; c. 对地质图件、航摄图像等则要按规定间距扫描取样。对航片那样从连续的模拟信号抽取离散的数值构成数字图像的取样叫抽样。对TM、MSS数字图像为了空间配准; 为使参加复合的各种数据资料具有相同的分辨力和像元大小, 有时需要插值, 再取样(见下节岳阳地区例子)。将抽样所得到各个样品的平均

辐射值转换成相当于某一灰度等级的数值叫灰级编码(即把数据资料进行量化)。通常是变换成0—255级。通过这些处理,使参加复合处理的所有数据资料具有统一的量纲。

把已经统一量纲的数据转换成网格数据,即使之成行成列。同时要对使用的各种数据资料进行配准,组成一个数据集。数据集内的各类数据,具有相同的像元数目、相同的比例尺,各数据中同一行、列的像元都代表地面相同的一点(同名地物)。如果参与复合的是多幅遥感图像,例如几幅TM图像或几个SAR条带,有时还需要进行图像镶嵌(参阅第四章第二节)。

(二) 图像配准

1. 投影变换 多源地学信息使用的资料多样,可能来自不同的地图投影系统。为使复合资料能够精确叠合起来,使同名地物能够在新产生的复合图像上其地理坐标、空间位置与几何形态吻合起来,有时要进行投影变换。如我国地形图使用高斯-克吕格投影,而陆地卫星粗制图像则采用横轴麦卡托投影。航磁资料一般使用地形图的坐标和投影系统,是南北正向的。而TM、MSS图像纵向与地理正北方向有一定夹角,非正南北(参阅第三章),如要把航磁数据与TM数据复合,就要先把两者坐标系统调整一致。

2. 几何校正与图像配准 各种遥感图像资料在成像过程中都会产生各种几何畸变(参阅第三章),因此,需要根据地面实况或地形资料,通过控制点的选取和几何校正,使得参加复合的各种数据资料得以配准。

(三) 内容复合(或叠合)与地学信息提取

在数据资料配准以后,就可以用计算机执行图像增强的技术方案,复合(或叠合)产生所需的各种资料和系列图像。表11-1是复合处理常用变量的组合方案。以复合处理得到的各种资料提取有关地学信息的方法,一是靠目视解译来提取,二是用数学分析方法来提取,还可以用地理信息系统或专家系统提取所需资料。

第二节 多源地学信息资料在区域地质研究中的应用

一、作基础影像资料

近十年来,遥感地学在国内外已有长足发展,利用遥感资料编制各种地质图件已遍及各个领域。故本书加强对地貌、岩性、构造等各章的遥感地质编图介绍。在区域地质构造研究或成矿规律分析与预测时,多源地学信息复合处理产生的图像,其用途为:①可以作为地学研究的基础影像资料;②以系列图像形式把各种地学信息直观地制成两维信息资料(图11-2),供分析及作为多源信息复合基础资料使用;③当然在某些特定环境下(如我国西部一些边远地区),缺乏地形资料条件下,把遥感图像作为地形资料来使用。

二、应用于区域地质综合分析与编图

(一) 用多层次遥感资料进行区域地质研究

1. 用不同分辨力遥感资料进行区域地质研究

为了解区域构造格架和编图,需要小比例尺、低分辨力的遥感图像;相反,为对区域内一些重要断裂、岩体及矿化地段细节进行解译,就要求大比例尺、高分辨力的遥感图像。表11-2表明,当遥感器的技术参数(最主要的是仪器的焦距)确定以后,成像时航高愈大,图像比例尺就愈小;同时,取得单幅图像所覆盖的面积愈大,但分辨力随之降低。

表 11-1 12种综合处理组合简表

		综 合 处 理 的 变 量 组 合
同类信息源不同种信息的综合处理	遥感变量 (1)	不同遥感变量之间 遥感变量与其派生变量 遥感派生变量之间
	地质变量 (2)	不同地质变量之间 地质变量与其派生变量 地质派生变量之间
	物探变量 (3)	不同物探变量之间 物探变量与其派生变量 物探派生变量之间
	化探变量 (4)	不同化探变量之间 化探变量与其派生变量 化探派生变量之间
不同类信息源不同种信息综合处理	(5)	遥感变量、地质变量、物探变量
	(6)	遥感变量、地质变量、化探变量
	(7)	遥感变量、物探变量、化探变量
	(8)	遥感变量、地质变量、物探变量、化探变量
	(9)	地质变量、物探变量、化探变量
	(10)	地质变量与物探变量
	(11)	地质变量与化探变量
	(12)	物探变量与化探变量

(据全国遥感地质工作协调小组办公室, 1991)

为了满足区域地质分析的以上要求, 通常是选用多层次遥感图像进行各种地质体的对比解译分析, 以发挥各种资料的长处。在甘肃北山地区进行大比例尺区域地质调查时, 就充分应用各种比例尺及类型的遥感图像, 进行不同尺度地质体的解译(表11-3)。

2. 利用遥感图像的抽象作对比解译与分析

用遥感图像的抽象能力来获取宏观区域构造特征、解译构造格架对遥感地质学工作非常重要。随图像比例尺变小, 地面分辨力降低, 各种地质体(包括线性构造)的细节被模糊化或隐没, 宏观地质特征相对被突出。滇东小江断裂东川市以南段, 构造挤压特征十分明显, 北段却不清楚, 反映

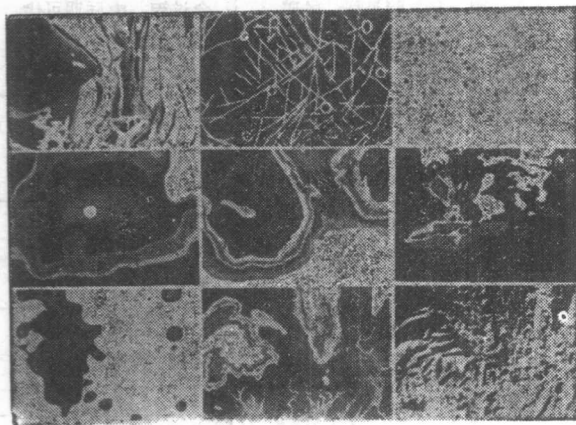


图 11-2 香花岭地区多种地学信息图像集

(据刘心季, 1992)

左上图.地质图像; 中上图.断裂图像; 右上图.矿产图像;
左中图.航磁图像; 中心图.重心图像; 右中图.航放图像; 左下图. S_n 异常图像;
中下图.地形图像; 右下图.遥感图像

两段断裂性质及地质历史有差异（图版56）。图11-3是美国纽约地区不同比例尺图像的线性构造统计资料，航高低的航片解译出线性构造短（0—4km）而数量多，陆地卫星图像则较长（8—20km）而数量少（C.A.Shuman, 1991）。

图11-4是Kapustin(1985)利用中等、中小、小到超小比例尺遥感图像解译出滨里海

表 11-2

相对航高(m) 焦距(mm) 像片比例尺		50	85	152	300	备注
大比例尺	1:2000	① 100	170	304	600	① 低空飞机
	1:10000	500	850	1520	3000	② 中空飞机
	1:20000	② 1000	1700	3040	6000	
	1:50000	2500	4250	7600	15000	③ 高空飞机
中比例尺	1:100,000	5000	3500	1520	30000	
小比例尺	1:200,000	③ 10000	17000	30400	60000	④ 航天遥感
	1:300,000	④ 150,000	255000	456000	900,000	

(据朱亮璞等)

表 11-3 遥感图像综合应用简表

图像类型	地质体解译	构造解译	蚀变岩与矿化解译	应用比例尺及阶段
MSS	地质体宏观分布规律分析, 了解岩石分布特征	大型区域构造格局分析	对已知矿产进行初步分布规律和成矿背景研究	1:20万—1:10万 初期阶段快速处理应用
TM	地质体划分解译主要依据之一, 可划分到段, 局部可划出厚层岩性层位	中——大型断裂褶皱解译, 构造应力场分析	划分主要蚀变带, 及主要类型, 成矿环境分析	1:10—1:5万应用于全过程, 中后期可代替MSS
彩红外航片	详细确定地质体边界及相互关系	中小型构造解译, 成矿构造分析	详细确定蚀变带位置规模, 确定矿化点位置	1:5万—1:6千(可放大到1:2千)应用于全过程
红外扫描片	参考解译主要地质体, 划分火山岩相带	对构造有一定反映, 参考解译	划分蚀变带	1:3万—1:5万, 主要应用于矿化蚀变解译
航磁图像	圈定主要磁性体边界	中深部断裂及地壳结构分析	成矿背景分析	1:50万—1:20万(受数据密度限制)
金化探图像	主要岩带的含金背景分析	主要构造带与金含量关系分析	矿化富集趋势及有利性分析	1:50万—1:20万(受数据密度限制)
复合图像	地质体与磁场, 金场对应分析	构造与磁场、金场对应分析	有利远景区的对应分析	1:50万—1:10万(受数据密度限制)

(据戴文略, 1991)

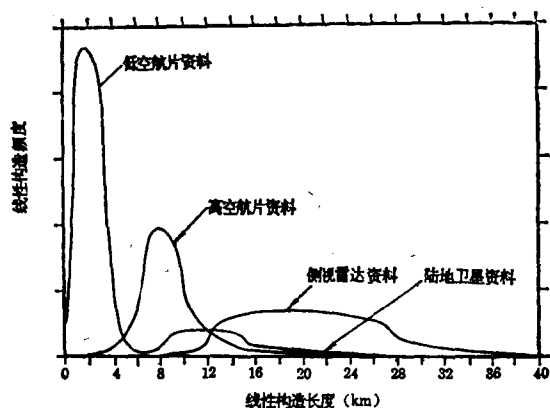


图 11-3 阿巴拉契高原各种图像的线性构造长度分类简图

(据C.A.Shuman, 1991)

盆地及其周邻地区的线性构造。与区域地质及地球物理资料对照之后,评价不同比例尺、在不同构造单元、不同走向的线性构造及其与已知断裂对应程度;确定每条线性构造在不同深度的构造层次的存在(即延深)。由于地质工作的习惯认识是:断裂构造的地表延长正比于延深(推覆构造、薄皮构造等例外),因而可以利用多层次遥感解译资料来定性分析断裂的主次与规模;建立区域断裂的构造格架;对比同一断裂的影像特征在不同地段变化。

3.用多源地学复合资料进行区域岩性识别与编图

利用遥感资料来识别岩性、圈定不同岩性的边界,历来是遥感地质的一个重点和难点。多源地学信息的应用,增加描述与区分岩性的标志。M.Fernandez与Alonso(1991)对东非卢旺达地区航磁、航放和TM的复合资料编制岩性分布图,把Th、U、K航空放射性测量数据先转换为当量浓度值,此值相当于伽玛仪产生的辐射信号的该种元素的理论含量(表11-4)。然后TM5分别与Th(R)、U(G)、K(B)做复合合成和IHS变换(图版19),并以表11-4的数值为依据编制出简易岩性图来(图11-5)。图11-6是原有的地质图件,可见图11-5岩性划分更为详细。

4.用复合图像编制区域地质图

为编制区域地质图,要求遥感图像精度高,波谱与空间信息丰富。机载合成孔径雷达(SAR)与星载多波段扫描图像如(TM、MSS、SPOT)的复合图像最接近这种要求。这类数字复合图像一直是国内外遥感研究重要内容。

岳阳地区SAR图像为X波段(波长2.4—3.75cm)HH极化,分辨力为3m(图版68)。

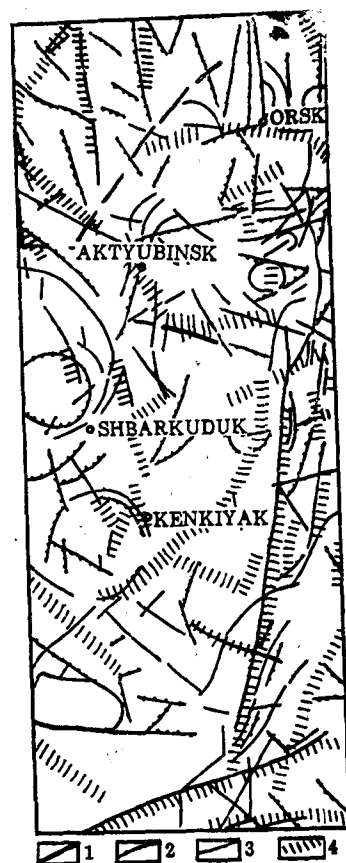


图 11-4 里海盆地东部遥感图像解译图

(据Kapustin, 1985)

- 1.据中、小比例尺空间图像解译出的线性构造;
- 2.据流星及礼炮卫星的小比例尺空间图像解译出的线性构造;
- 3.据中比例尺Salyut-4及SPOT-1空间图像解译出的线性构造;
- 4.据超小比例尺ISZ的电视图像解译出的线性构造带

(注:图内未译出的是地名)

表 11-4

中生代	火山岩-1	23	9	1.9
	火山岩-2	10	4	0.4
中元古代沉积岩为主地区	沉积岩-1	15	4	1.1
	沉积岩-2	11	4	1.1
	沉积岩-3	14	7	0.7
	(平均值)	12.5	4.5	0.8
中元古代变质岩为主地区	变质岩-1	16	4	0.8
	变质岩-2	22	5	1.0
	变质岩-3	23	6	0.8
	变质岩-4	10	6	1.8
	(平均值)	18.5	5.3	1.0
	变质岩-5	22	7	0.8
	变质岩-6	19	8	2.3
	变质岩-7	18	4	0.6
	沉积岩-4	10	3	0.4
	沉积岩-5a	14	6	0.9
	沉积岩-5b	11	4	0.5
	平均值	钍	铀	钾

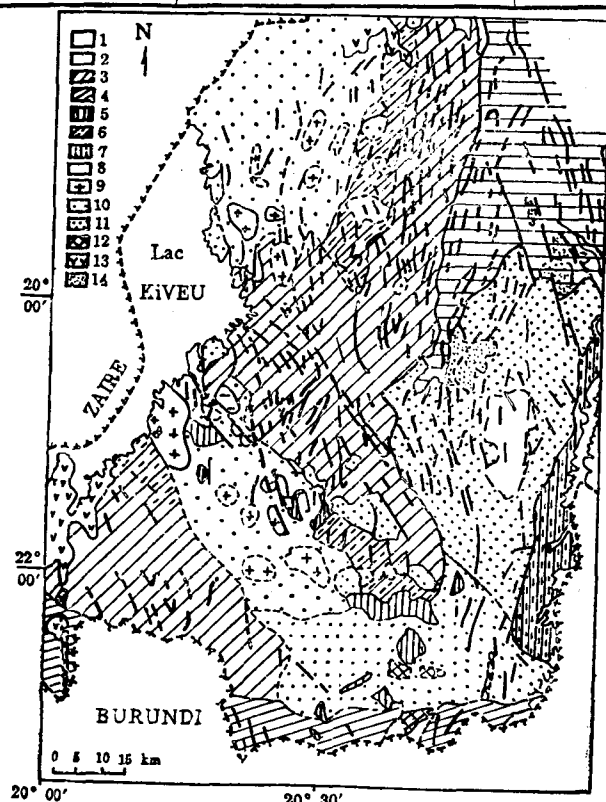


图 11-5 卢旺达西部岩性解译简图

(据M.Fernandez-Alonso, 1991)

Sed-1, 2, ...解译出不同沉积岩, Cry-1, 2, 3...解译出不同结晶岩, av主要岩石平均值, 粗线为线性构造, 细线为岩性界线, 具体岩性名称原图均从略

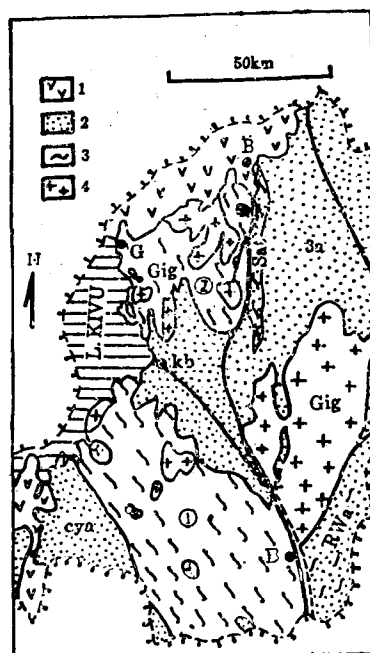


图 11-6 卢旺达西部构造-造性单元图

(据M.Fernandez-Alonso, 1991)

1.第三纪到现代熔岩; 2.低级沉积变质地体; 3.花岗质变质杂岩; 4.花岗岩
(图内的英文是地层单元及城市名称的简写)

复合处理包括：①把SAR扫描资料转换为地距图像；②进行投影变化和数字镶嵌；③重采样使SAR及TM的像元大小统一为7m，④按TM4+SAR(R)、TM5+SAR(G)、TM3+SAR(B)作假彩色合成图像(图版24)。复合图像比单幅SAR、TM对区域地质解译与编图有如下主要优点(朱亮璞, 1991)：①更强的立体效应，便于构造与地貌解译，图版24上△处莲沱组(Z_{2l})不整合于冷家溪群(Pt)之上，单面山的构造地貌十分清楚。②MSS/TM的云下阴影与SAR图像上因微波直射受阻产生的阴影区在两者复合图上得以互为补充，改善图像质量。③微波辐射能显示浓密植被下的某些地形细节，使像冷家溪群那样岩性单调、构造复杂，又缺少可供地面追索的标志层的地层，能够凭复合图像上垅脊、陡坎等微地貌特征，揭示其细部地质构造和层理。我国有很多类似中浅区域变质岩(如华南冷家溪群、华北蓟沱群等)，一直缺少能揭示其内部构造的技术手段。上述复合图像是一种有开发潜力的技术资料。④由于波谱与空间信息丰富，也增强了编图时岩性-地层单元的识别与划分(图11-7)。

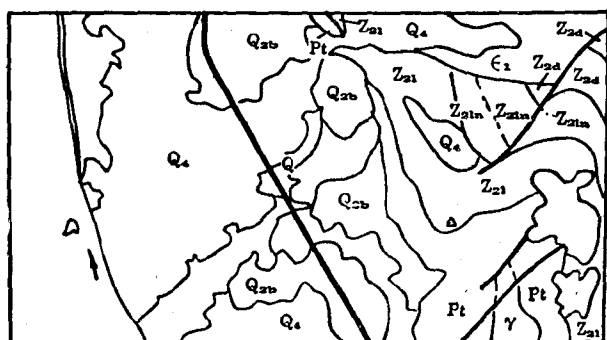


图 11-7 岳阳地区SAR与TM数字复合图像地质解译图

(据朱亮璞, 1991)

Q₄.现代河流沉积； Z_{2d}.陡山沱组； Q₄.坡残积；
Z_{2ln}.南沱组； Q_{2b}.白沙井组； Z_{2l}.莲沱组；
Z₁.下寒武系； Pt.冷家溪群； Z_{1dn}.灯影组

为能直接显示Th、U、K三种放射性元素在地壳表层的含量分布。对地质图等平面图件，首先进行整饰处理，如对陆地卫星数据的几何校正，使其经纬网坐标系统与地形图件相匹配。对各种解译图件统一比例尺等，即按本章第一节中的数字化、网格化、编码、几何配准等步骤，形成矢量数据文件，以便建立多源信息图像数据文件库，为复合、叠合作好准备。

图版22是在TM图像目视解译(全向或不同方向)线性构造的资料基础上，进行密度统计，把U(R)、Th(G)、K(B)假彩色合成图像与全方位线性构造密度统计图的叠合(叠和)图像。

线性构造的统计是经过试验后，选定一定半径的圆为窗口，统计出全区每个窗口线性构造长度之和，绘出线性构造等密度图。并按密度一定的网值及地质资料，确定高值区构成的线性构造带。第二是对线性构造的几何形态进行研究，分为“Y”、“O”、“U”、“X”等型。第三是结合区域地质及解译资料，分析这些线性构造带与区域断裂、火山、

(二) 多源地学信息资料在断裂、线性构造研究中的应用

1. 对内蒙东南部线性构造带的研究

研究区位于内蒙东南与河北省交界处，区内矿化受岩性、断裂、火山盆地等因素控制。

使用的多源地学信息资料包括：①遥感(TM磁带)、航磁、航放等数据资料；②地质图、矿点分布图、线性构造解译图等二维平面图件；③其他地质资料。对航空放射性测量资料，经过含量、放射性平衡、高度、大气等多项校正处理，使测量数据转换

盆地边界等的关系，推断其地质成因。最后探索其与区域成矿（铀、金等）的空间与成因关系。何钟琦等（1992）还根据地质、遥感、航磁等多种特征信息资料，分析与断裂有关的线性构造的切割深度（表11-5）与产状特征（表11-6）为断裂遥感半定量研究提供新的技术途径。

表 11-5 线性构造带产出深度特征识别（模型）表

特征信息 识别目标	地质（G）			遥感（R）		航磁（M）			
	断裂 F	盆地 B	岩体 Ma	LD	CD	HM	LM		
盖层断裂带									
基底断裂带									
超基底断裂带									

（据何钟琦等）

F—地质观察断裂；Ma—岩浆岩体；B—中新生代盆地；
F、Ma、B三者可以是断续出露的；
LD—遥感图像线性构造带（单位面积断裂构造总长度）；
CD—遥感图像线性构造区（单位面积环形构造数量）；
HM—磁场高通方向滤波显示出的线性特征；
LM—磁场低通方向滤波显示出的线性特征

表 11-6 线性构造带产状特征识别（模型）表

特征信息 显示特征	陡 倾		缓 倾		贯 通	隐 伏
	重合	不重合	重合	不重合		
LD						
HM						
LM						

（据何钟琦等）

2.用航磁与遥感资料综合分析线性构造

航磁资料是多源地学信息中最常用的一种非遥感资料。通过对航磁值的高与低及正、负异常来解译基底磁性与非磁性岩石分布，推断基底断裂的特点。航磁资料的不同深度延拓与不同方向滤波，配合遥感资料解译线性构造非常有用。航磁资料常经处理成下列几种平面图：①航磁 ΔT 彩色图像；②航磁 ΔT 等值线图（图11-8右上）；③航磁 ΔT 剩余磁场图；④航磁不同深度的延拓图（图11-8左上）；⑤航磁不同方向的卷积图；⑥航磁 ΔT 的LAHE图；⑦航磁 ΔT 不同方向的二次导数图（图11-8，左下）；⑧航磁 ΔT 的阴影浮雕图（图11-8右下）等种类。当然也可以把航磁资料与遥感图像进行复合处理（图版20），或把航磁资料与岩性界线叠加起来，这对研究区岩性磁性的解译与分析都非常直观有用。通过分析可以取得研究区构造格架、优势断裂或线性构造发育方向及特点，以及断裂、线性构造与其他地质体的相互关系，对区域成矿预测提供新的认识。

（三）多源地学信息复合资料在隐伏岩体和构造岩浆带遥感地质研究中的应用

1.用重、磁资料与SAR图像复合来研究香花岭岩体深部构造特点

应用SAR、航磁、重力与陆地卫星遥感多源地学信息复合来研究我国著名南岭多金属矿带，并预测成矿有利地段（易昌善，1990）。首先对SAR图像进行重采样，使分辨率变

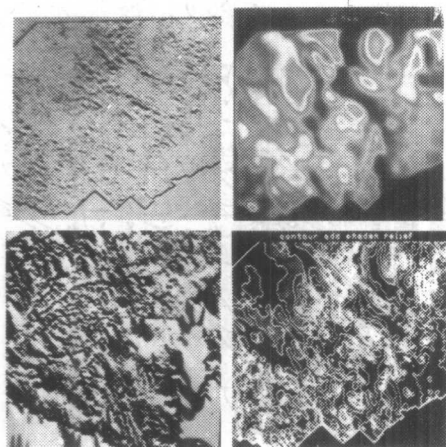


图 11-8 航磁资料的几种处理
(据徐玉贤、李恭)

左上.江浙皖航磁 ΔT 上延5km图像;左下.江浙皖航磁 ΔT 东西向二次导数图像;右上.江浙皖航磁 ΔT 等值线图像;右下.江浙皖航磁 ΔT 阴影浮雕图像

为 $30\text{m} \times 30\text{m}$,对分辨力较低的航磁与重力资料用内插方法也使它变成 $30\text{m} \times 30\text{m}$ 的分辨力。然后将上述资料转换成图像形式,对航磁与重力在统一的公里网坐标系下配准,两种异常图分别用不同颜色表示其数据大小(表11-7)。在此基础上,再分别以航磁异常数据为H、重力异常为S、SAR图像为I,作HSI变换所得假彩色合成图像(图版20)。据孟赛尔颜色系统的关系,彩版中色彩的变化反映航磁 ΔT 的强度变化,其中蓝紫反映航磁高值,色彩饱和度则是重力异常的强度。每种颜色中渗入白光愈少,重力异常值愈高。

香花岭矿田是湖南耒阳—临武南北向拗褶与嘉禾—资兴北东向深大断裂复合部位的通天庙穹隆背斜处。背斜核部是寒武纪变质岩系,两侧是上古生代地层,并有中生代侵入的中酸性岩株、岩瘤出露地面,多金属矿化、矿点普遍。通天庙穹隆

表 11-7

色 彩	红	黄	绿	青	蓝	紫红
重力数据	< -62	-60	-56	-54	-52	> -50
航磁数据	< -1	0	$+5$	$+10$	$+20$	$> +30$

(据易昌善, 1991)

背斜在MSS/TM、SAR及航片上均显示有多层环状影像特征。布格异常图也显示为椭圆形,但范围比穹隆背斜更大。区域重力异常图像上以深浅不同的色调显示出三层环状影像特征,表示岩体地下部分的展布范围与几何形态特征(图版70)。即岩体的顶部有小的局部突起与凹陷,突起处是岩枝、岩瘤,基部是相连的,是中酸性大岩基。图11-9是显示由各种数据所得出的环形影像。

由于隐伏小侵入体(如岩枝、岩瘤)的揭露对寻找隐伏矿体很有意义,应充分利用各种地学信息资料作综合分析,如利用化探圈闭异常(欧阳成甫, 1990)或某些特殊影像特征来解译隐伏岩体。

2. 用多源地学信息资料研究构造岩浆带

内蒙东部白音诺与黄岗梁一带是我国北方重要多金属成矿带。通过重、磁资料与MSS图像的复合,揭示区内存在两条侵入时代、岩性与成矿类系都不尽相同的构造岩浆带(图11-10及图版21左中)。其中NE向延伸的是花岗岩类,重力低;NEE向展布的是中酸性花岗闪长岩类,重力高。据物探资料与遥感影像特征分析:①NE向穿插NEE向的,时代分属中生代燕山早与中晚期。②花岗岩构造岩浆带的深部为复式岩基,中深部处为钟形岩体突起,浅部则沿断裂侵入,形成大小不等的花岗岩侵入体。③NEE展布的花岗闪长岩构造

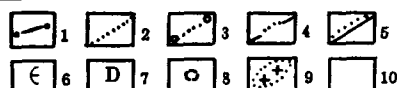
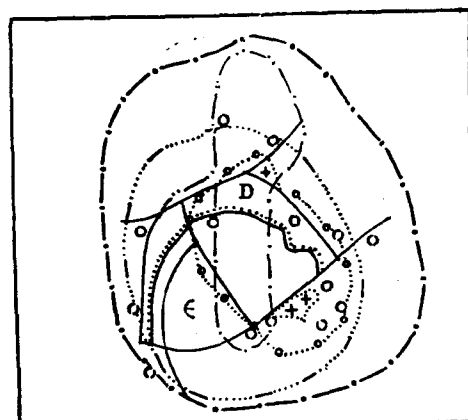


图 11-9 香花岭岩体的各类数据的环形影像

(据李恭, 1991)

- 1.重力区域异常; 2.遥感; 3.Sn、Ag、Zn累加晕;
- 4.航磁极区异常; 5.不整合界线; 6.寒武系;
- 7.泥盆系; 8.矿床(点); 9.岩体(请与图版70对照)

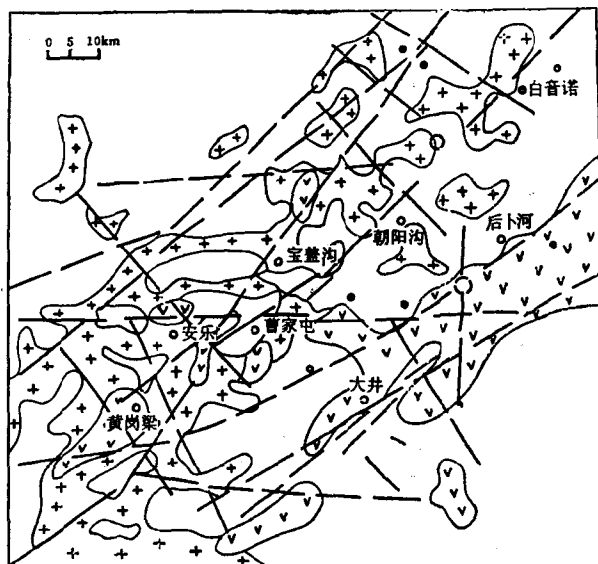


图 11-10 由重磁异常图像揭示的岩浆构造系列

(据李恭, 1991)

- 1.酸性岩带; 2.中酸性岩带; 3.基底断裂;
- 4.已知矿床; 5.火山机构

岩浆带的重磁资料显示,岩体沿EW、NE和NW三组断裂交叉处侵入,在卫片上呈现向心环状影像特征。④据区域成矿资料分析:Sn、W、Mo、Pb、Zn与花岗闪长岩构造岩浆带有关,而Cu、Pb、Zn、Ag等多金属则与较晚的花岗岩类有关。

第三节 多源地学信息资料在矿产资源 勘查中的应用

一、在多金属、金矿勘查中的应用

多金属、金矿勘查工作中的多源地学信息的应用最广,国内外实例也多。我国南岭香花岭地区、秦岭地区、内蒙东部、新疆阿尔泰、哈密地区、中条山区、五台山区、长江中下游等许多地区多金属矿、金矿床都有很好实例及应用成果。现以香花岭地区遥感成矿预测为例,说明多源地学信息对成矿远景地区,用计算机作统计预测的方法实例。

(一) 香花岭地区地质矿产概况

香花岭地区属南岭多金属成矿带。铅锌矿作为预测矿种,已有地质资料表明,区内铅锌矿的分布受北东、北西向两组断裂控制,在断裂构造交切部位常是良好的容矿区。燕山早期花岗岩体与本区多金属矿化的关系密切,石炭一二叠纪碳酸盐岩是铅锌等有色金属的主要含矿层位。

(二) 使用资料

主要有:①遥感资料:由1984年获得的X波段雷达图像;②物探资料:已网格化处理的500m×500m重力测量资料;③化探资料:铅、锌、铜、砷、锡、钼、钨、铋、金、银十种元素的土壤地球化学测量数据,已网格化成500米×500米;④地质资料:香花岭地质

表 11-8 香花岭预测区变量选择表

定量变量	遥感	X_1	水平方向结构信息
		X_2	45°方向结构信息(反映北西向结构特征)
		X_3	黑白对称度
		X_4	几何对称度
		X_5	方向度
	化探变量	X_6	铅元素测量值
		X_7	锌元素测量值
		X_8	锡元素测量值
		X_9	铜元素测量值
		X_{10}	砷元素测量值
		X_{11}	钼元素测量值
		X_{12}	铅-锌-银共生组合
		X_{13}	钨-锡-铋共生组合
		X_{14}	砷-锑-金共生组合
定性变量	物探	X_{15}	剩余重力异常
	地质变量	X_{16}	石炭一二叠纪地层出露情况
		X_{17}	灰岩类岩性
		X_{18}	岩浆岩体出露情况
		X_{19}	重磁解译的浅部隐伏岩体出露情况
		X_{20}	控矿断裂通过(或从邻近通过)
		X_{21}	重磁解译的浅部磁性体出露情况
		X_{22}	北东、北西向断裂存在
		X_{23}	环形构造存在
		X_{24}	内接触带
		X_{25}	外接触带
		X_{26}	大理岩化
		X_{27}	角岩化
		X_{28}	有其他矿床(点)产出

(据易昌善)

判据,当 $S \geq 0.2944$ 时为矿床区, $0.0384 < S < 0.2944$ 时为矿化区,而 $S \leq 0.0384$ 时为无矿。根据所建立的模型和判据,对工作区832个单元进行判别计算, S 值越大,其成矿可能性也越大。所得预测结果用图像表示如图版17。

(四) 结果分析

从图版可以看出,绝大部分已知矿点、矿床均位于预测区内,有些原来为未知或已知仅有矿化的地区得分较高,表明有较大的找矿远景。提出的远景区均有良好的成矿地质条件和化探异常分布。这些结果部分已被生产单位的进一步工作所验证。

新疆星星峡地区遥感找金工作代表了多源地学资料综合处理用于成矿预测的另一个方面^①。

工作中选用了陆地卫星MSS、航空磁测、化探分散流元素测量、数字化岩性地质图以及遥感图像线性特征密度、中心对称度分析数据,所有数据按 $250 \times 250\text{m}^2$ 的单元尺寸进行重采样,并相互配准在统一的坐标系统上。所有数据均归一化至0—255范围以利于显示处理。然后选择马庄山金矿区作为训练区,采用多元统计分析和数字图像处理技术,获得训练场的统计参数,建立统计模型,得到综合变量及其拟合方程,据此突出那些与矿化有

①植起汉等,星星峡地区典型矿区多源信息的综合处理应用研究。1998,中国有色金属

关的信息,从而建立马庄山金矿区由下列基本要素组成的多元信息综合找矿模式:①遥感图像上的多组线性构造汇聚(线性密度高值处)、环形构造 环形细致的浅色域(即图像高亮度值);②线性体高密度、高中心对称度的线性体统计特征;③与火山岩有关的弱磁异常;④金、砷分散流的中高值异常。以上各异常要素的组合,反映了马庄山金矿床形成的地质背景,揭示出矿床形成的内在规律,根据这个模式,可为该地区寻找同类型的金矿提供定量化的依据。

近十年来国内外都大力开展遥感找金工作,取得一定成效。根据不同金矿类型(脉金型、蚀变构造岩型、与韧性剪切带有关的、与火山热液有关的种种类型),重点开展了①通过多光谱资料及多源信息复合,来揭露与各种类型金矿伴生的蚀变带(如黄铁矿化及铁帽、泥化高岭土化等)。其中高光谱分辨率扫描仪(AIS)等遥感数据资料的应用,尤其值得重视。②研究线性构造密集带、韧性剪切带、环状构造与金矿成矿与赋存。《金矿遥感及其综合评价方法》(1991),汇编了国外遥感找金的例案与技术方法,很有参考价值●。

二、在能源矿产勘查中的应用

(一)油气资源勘查中的应用

应用遥感技术来直接勘查油气资源,主要是通过多波谱遥感资料,发现油气渗漏造成的影像异常,作为油气地面显示的标志(见第八章第一节)。用遥感技术间接为油气勘查服务包括:①用遥感资料作区域构造解译,目的是查明有利含油区带及构造圈闭,②详细构造解译,一般要用多源地学信息资料来确定勘查的靶区。

1. 区域构造解译工作中的解译模型建立

通过解译和分析,可以得到取得线性构造和环状构造的区域构造特征,有利的油气盆地的边界,盆地发展模式及形成机制,可能的含油气区带的展布等资料。构造解译方法在第七章中已有述明,在此仅对与遥感油气勘查有关的两个问题作介绍:

第一,用地貌构造异常模型来分析平原区的隐伏构造。在平原区,尤其像亚马逊平原那样的热带雨林区。地面无露头,地形平缓,植被浓密,穿行困难。在这样地区内应用遥感资料(尤其是合成孔径雷达资料)来进行油气勘查就非常合适了。方法是通过相关分析,研究隐伏构造的地面地形、地貌显示,进而建立地貌构造异常模型,指导勘查工作。图11-12及图11-13是穹隆及受断层控制的穹隆的地形、水系理想模型(F.P.Miranda, 1986)。对解译出的构造,①要利用多源地学信息资料(尤其是航磁资料)的检验,②要对解译出的构造进行置信度及相似性的分析。

第二,在区域构造解译与分析基础上,研究构造组合形式,总结出构造样式来。因为不同的地区有不同的构造发育特点,不同构造样式有不同的油气圈闭类型。通过比较大地构造学分析,就可以在已有地质认识及遥感解译资料基础上,预测含油气远景地区内可能出现的构造组合形式和有机的圈闭类型。图11-14是新疆吐(鲁藩)哈(密)盆地的局部构造样式。

2. 用多源地学信息资料在详细构造解译优选有利油气构造

●金矿遥感及其综合评价方法(一)、(二)、(三),全国遥感地质协调小组及地矿部情报所,杨庭槐等(1991)

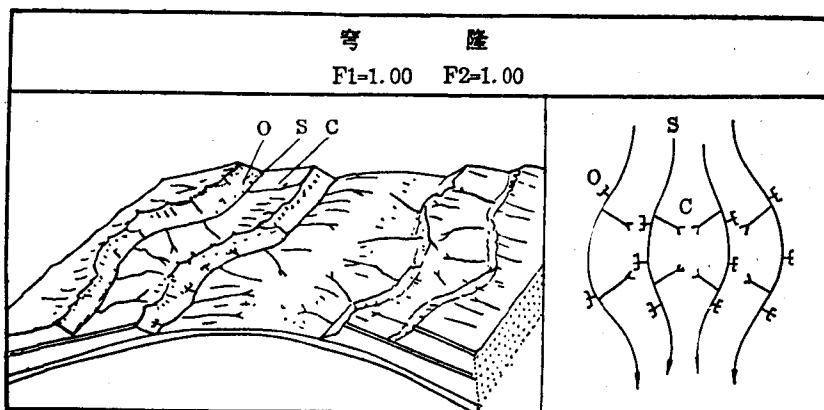


图 11-12 理想穹隆模型

(据F.P.Miranda, 1986)

S代表与缓褶皱地层走向相关的后成河(环状水系), C代表与倾斜坡相关的顺向河(辐射状水系), 不对称水系由逆向河(O)和顺向河确定, 与后成河辐射倾斜分布有关

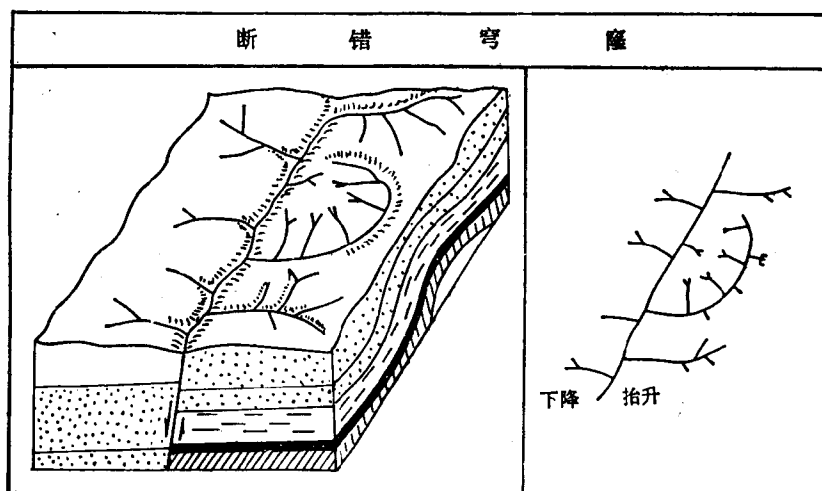


图 11-13 断层控制穹隆的理想模型

(据F.P.Miranda, 1986)

冀东地区利用油气田上方普遍存在的烃类微渗漏引起的化探异常, 与遥感资料复合, 提取多维信息的主因子成分, 建立定量的特征模式, 对全区作监督分类, 从中选出含油气有利地段。

地质背景: 该区处于南堡凹陷北部, 地下断块构造发育, 地表为第四系覆盖, 南16井于1800m井深获工业油流。分析使用资料: TM图像与地球化学 勘探500m×500m采样, 进行土壤吸附烃、蚀变碳酸盐、荧光发射光谱、紫外吸收光谱等四类21项指标分析。

复合处理包括: ①化探数据预处理, 概率分布检验, 因子分析, 聚类分析。②TM图像校正、配准。③波谱数据提取。④波谱数据与化探数据相关分析, 建立监督分类样本。⑤预测含油气异常区。

结果评价: 图11-15为该地区化探数据异常图。异常区内 部为荧光异常, 外围为化探

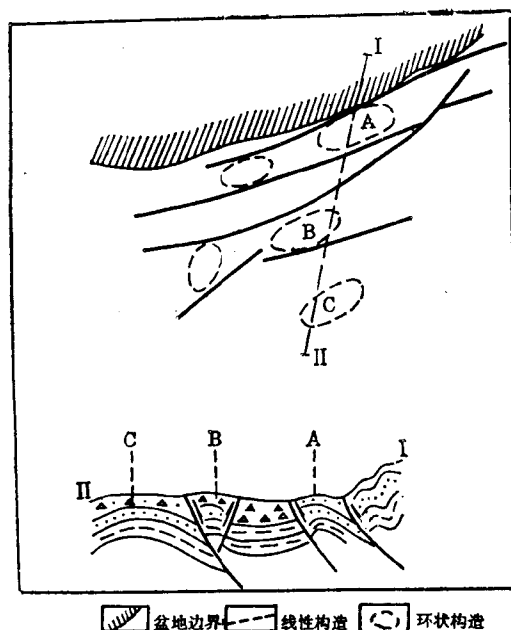


图 11-14 吐哈盆地台北凹陷局部构造样式图
(据王桂宏, 1991)
A. 逆冲断背斜; B. 断块构造; C. 挤压背斜

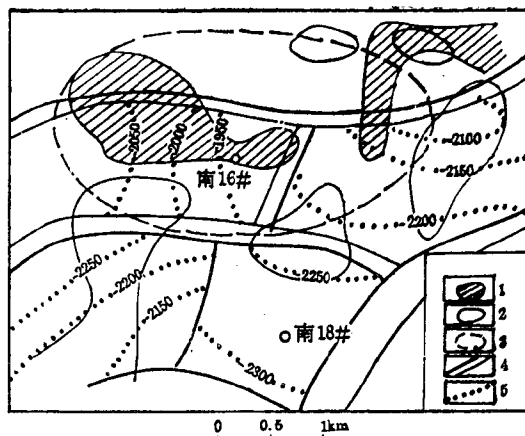


图 11-15 冀东某油田化探异常图
(据张颢, 1992)

1. 荧光异常区; 2. 化探数据第一主因子异常区;
3. 综合异常范围; 4. 断层; 5. 中生界底界等高线

数据主因子分量异常, 构成典型的化探异常模式。图11-16为遥感化探数据综合异常图。该图为遥感、化探数据综合处理后, 选取第二主因子的波谱分量做等值线图, 经计算确定综合异常的阈限值为 $36 < mf_{28} < 38$ 。图中斜线部分为遥感、化探综合分析异常区, 异常

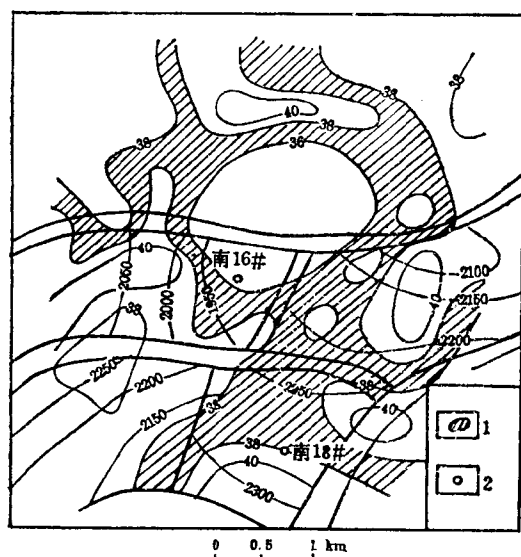


图 11-16 冀东某油田遥感化探综合异常图
(据张颢, 1992)
1. mf_{28} 异常区; 2. 井位

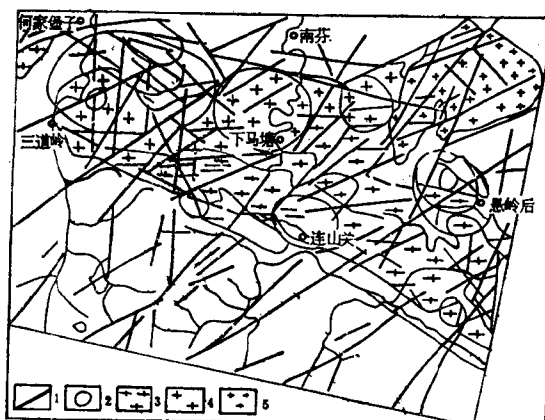


图 11-17 连山关地质遥感-地质-能谱图像地质解译图
(据刘德长, 1991)

1. 断裂; 2. 环状构造; 3. 五台期混合花岗岩;
4. 吕梁期混合花岗岩; 5. 燕山期花岗岩

区围绕南16井控油范围的上方呈环状分析,与化探异常基本一致,指示可能的油气范围。

(二) 铀矿资源勘查中的应用

航空放射性测量资料与遥感、地球物理的复合,有效地对铀、钍等放射性矿产进行预测。辽宁连山关岩体是我国一个重要产铀地区。该区U、Th、K航放资料经过插值、数据压缩(或拉伸)、灰阶转换而形成彩色影像图。经过这样处理的能谱图,以二维影像特征来显示各种地质体的(U、Th等)放射性强度大小。图11-17是对航放U资料通过比值法、定向滤波、拉普拉斯变换、卷积、局部放大等处理的图像进行线性构造与环状构造的解译,得到U的伽玛能谱图,即地物放射性强度的大小所显示的线性及环状影像的解译资料。同时对该区陆地卫星资料进行线、环构造解译。上述两幅图像叠合工作流程图见图11-1。

通过对矿床地质研究,认为U、U/Th、U/K等是铀成矿有利系数。选定多个对成矿有利参数的高值区的复合,作为区域成矿有利地段。图版69是这些有利地段与MSS叠合图像,经地面检验,效果很好。

(三) 煤炭资源勘查中的应用

遥感资料在煤炭资源勘查主要应用在两个方面。第一,是为煤炭资源勘查所需的,对含煤地层区域展布与矿田构造研究。第二,与煤炭资源开发有关的环境地质、水文地质的遥感研究。由于煤层、煤系地层中碳含量相对围岩高,红外辐射系数较大,水的热容量与热惯量比其他地物有更大的差异,煤自燃产生的热量很大。这三者在近和中远红外波段都有较明显的反映。因而煤炭遥感中红外遥感资料用得更多。吴玉民(1990)利用陆地卫星像片的遥感地质解译,根据松辽拗陷区内隐伏煤盆地内拗陷断块发育区是煤系地层厚度大以及影像特征的认识,结合物探、地质资料,进行成煤预测,并得到了初步证实。第六章对山西太原西山的石炭、二叠纪煤系地层的夜间热红外研究,由于煤层有很低的热惯量,黎明前其辐射温度较围岩低,呈现冷色调(呈暗色)(图版67图6-8)。对太原市地区的热红外扫描图像与彩红外航片的复合试验,为煤炭资源勘查及煤矿地区环境、水文地质研究作了十分有益的探索。管海晏对唐山地区水文地质红外遥感研究,为矿区的治水提供宝贵资料。孙仲安(1989)对京西及太行山地区SAR煤田水文地质的应用研究,肯定了SAR图像资料在平原与山区的水文地质的应用。

三、从多源地学信息中提取找矿的基本信息

利用遥感技术进行矿产资源勘查时,尽管在不同地区、不同矿种及不同矿床工业类型的找矿所使用的资料、方法、工作步骤不完全相同,但工作的内容总是为了提取下列四类找矿信息:

(一) 提取含矿地质体的信息

研究的第一个目的,就是企图通过对遥感和非遥感资料的处理与地质解译。确定矿源层、含矿岩体、含矿脉体、矿化蚀变带和铁帽等含矿地质体的存在。通过地物波谱测试来寻找能指示含矿地质体存在的波谱特征。第六章对太原西山煤系地层的热特性研究,第八章引用美国金场矿区,中心波长为 $1.6\mu\text{m}$ 及 $2.2\mu\text{m}$ 的TM5及TM7波段对蚀变与非蚀变岩的区分,以及蚀变亚带的划分。本章利用Th、U、K放射性异常对连山关岩体进一步划分,都是为了确认含矿地质体的存在。

为确认含矿地质体的存在的另一个技术途径是,通过对与成矿有关的某些蚀变矿物波

谱特征的识别,间接地确定含矿体的可能存在。如矿化蚀变产生硫化金属矿物(如黄铁矿),它风化产生的明矾石、黄钾铁矾、氯黄晶矿等标志性矿物的半定量波谱检测(其中用高光谱分辨力多通道成像波谱仪的资料来检测是最有发展潜力的)来间接确定含矿地质体的存在。

从遥感图像上提取另一种含矿地质体的信息,是识别出矿化和矿体的特殊形态特征。如美国得克萨斯湾沿岸及伊朗扎格罗斯山脉盐丘构成的环形影像。冀东鞍山式铁矿构成的细小垄脊地形,浙江武义一带含莹石的石英脉的浅色纹带等。

第三是提取某些与成矿有关的地质体的重、磁、放射性及化探异常。如第六章煤层的热异常,如本章连山关岩体的放射性异常,冀东油田的化探异常的提取。

(二) 对与成矿有关构造信息的提取

对区域成矿及矿区(段)与成矿有关的构造的研究,主要是综合分析下列构造:①控岩控矿构造,②导岩导矿构造,③储岩储矿(或容岩容矿)构造的类型、性质、展布及演化特点几个方面。其中最多的是把线性构造的高密度区或交叉点高密度地区,作为导(容)岩(矿)的有利部位。把断裂、剪切带等构造局部拉伸、引张造成的扩容作为有利储矿构造部位。对上述构造认识的建立其一是通过对已知矿床、矿点、矿化地段空间分布特点与构造的产出位置相互关系的分析取得;其二,是依靠地面地质认识的总结。前苏联著名穆龙套金矿就是根据1:20万航天影像资料和1:10万地形图的地貌构造分析,来确定赋矿部位的构造位置的。

(三) 建立区域遥感找矿、成矿模式

找矿或成矿模式(或称模型)实际上是把对区域性的遥感找矿的认识加以模式化。通过类比方法来寻找地质条件和影像特征相似的地段,来指导遥感找矿和成矿预测。这种模式的建立应当充分参考矿床学有关理论。模式的种类很多,可以是某一种矿床工业类型的综合模式,如美国内华达州金场地区对斑岩铜矿的成矿模式。但更常见的是建立某一种控矿条件的模式来指导遥感找矿。图11-12、11-13是构造-地貌模式(图11-18)。为找寻与隐伏岩体有关的多金属矿的“多元同现模式”(图版18,图11-19)以及据遥感影像线环组合影像特征异常总结出的遥感金属矿田构造模式。

(四) 成矿有利地段预测

成矿预测通常是在建立找矿模式基础上,以便正确选出统计分析的因子及确定权重,用数理统计分析来预测成矿有利地段。预测的方法有:①利用线性构造和环形构造分析圈定找矿远景区,②用线性构造和其他变量统计圈定找矿远景区,③利用线性构造和其他成矿因素统计加权预测矿产远景区(陈华慧等,1984),以及第八章和本章中述明的用多波段及多源地学信息复合处理来确定成矿有利地段的实例。

为提取找矿基本信息,有时要用多源信息复合资料来编制地质解译图、遥感成矿预测图等系列图件,并要对预测的远景区按一定原则进行分级和分区。应用遥感技术,应用多源地学信息复合技术来分析区域成矿特点和规律,预测成矿远景地区,其优点是:通过综合分析,能更好地确定找矿重点地段(即收缩靶区),提高找矿的工作目的性与工作效率,是地质找矿(尤其是寻找隐伏矿床)的一种有潜力的技术手段。

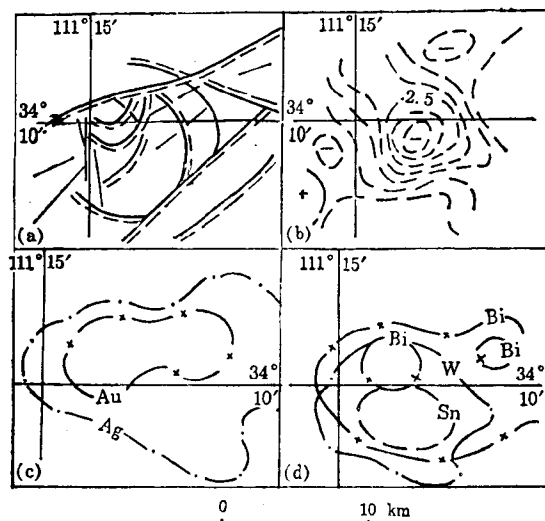


图 11-18 多元同现模式解析图

(据戴文略)

a. 遥感环状构造；b. 布格重力异常；c. 金、银地球化学异常；d. 钨、锡、铋地球化学异常

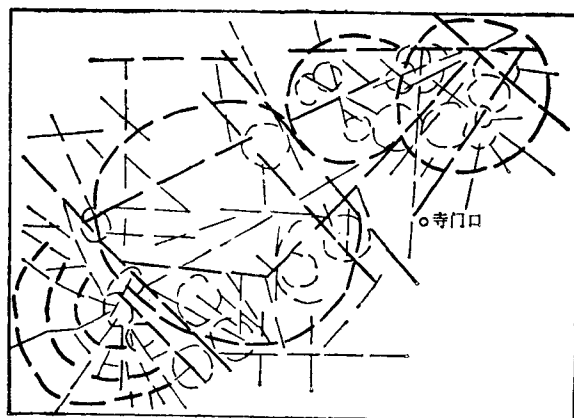


图 11-19 寺门口串珠状环形构造解译图

(据楼性满, 1988)

第十二章 遥感资料在其他 地学领域的应用概述

第一节 遥感资料在环境、水文、工程 地质工作中的应用

一、地质灾害的遥感监测与研究

地质灾害的种类很多,火山、地震、滑坡、泥石流、地面沉降、水土流失、沙漠化、盐碱化等。遥感资料尤其卫星图像能大面积、周期性具体而微地把地面实况记录下来,为地质灾害的定时定位监测、预报研究提供极为宝贵的资料。对地质灾害的实时监测更是地学遥感发展的一个新方向。

我国是地震较多的国家。地震灾害主要是由断裂的新构造活动引起,多波段多时相遥感资料对大断裂的新构造活动研究很有效。从遥感资料可以获得:①查明区域断裂格架基础上,把易诱发地震的活动断裂交切点、端点、拐点,这些都是地壳应力最集中的地段,为孕震及发震构造研究提供非常有用的基础资料。②对已经发生震灾地区的遥感图像(如唐山地区),为震灾调查与评估、地震地质研究提供其他技术方法无可取代的资料。③利用遥感某些特殊影像特征,进行地震预报与分析,如强祖基等(1991)用多时相NOAA卫星热红外图像对1990年中国与独联体边界斋桑泊两次强震研究(参阅第十一章有关部分)。④为研究板块活动及地震预报,美国在圣安德列斯断裂两盘各安装一台红宝石激光器,利用1972年发射的激光测地卫星反射回来的信号,长期、定位地监测断裂两盘精确位移。

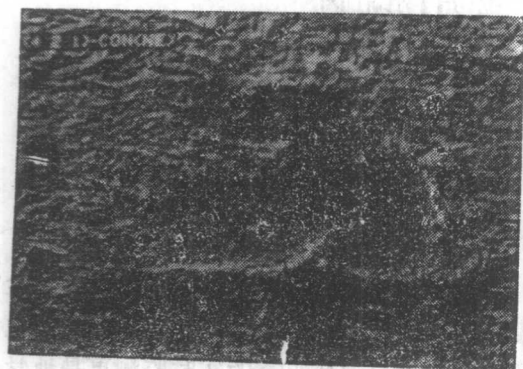
滑坡泥石流是交通、水利建设重要自然灾害,对我国西北地区交通及长江中上游航行和水利工程危害大、损失重。长江三峡工程的环境地质工作就包括库区沿江地段滑坡的调查。R. Guillande 等人(1991)对安第斯山滑坡灾害研究时,把构造、地震、地表径流以及用数字图像编制出边坡坡度大于 30° 的坡度图,作为诱发滑坡的因子来研究滑坡。铁道部遥感工作者通过具体调查,提出用遥感图像来判定泥石流沟的八条直接解译标志与统计判别的标准,并据此判定成昆线和普雄工务段的某沟为泥石流沟,采取措施,使1986年7月6日暴雨引发的泥石流的破坏损失减小到最低。

二、区域环境地质监测与评价

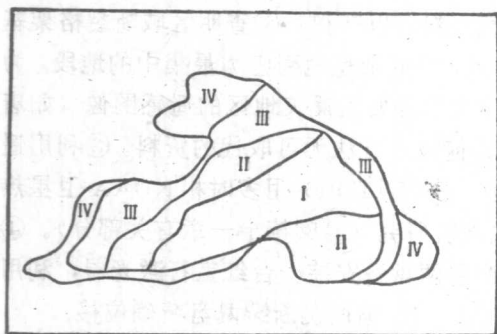
神(木)府(谷)地区是我国新兴煤能源基地,位于毛乌素沙漠与陕北黄土高原过渡区,生态环境比较脆弱。开发前对其进行遥感环境地质评估,以便采取正确开发方案,以保持较好生态环境。评估采用多波段(TM/MSS 彩红外及黑白航片)、多时相(卫片1973—1978年八个时相,航片为1956—1987年多个时相)、多比例尺(1:2万、1:6万、1:100万)遥感资料。以常规增强处理及目视解译为主,编制系列图件^①。图12-1a, b是可作为

① 神府—东胜地区环境地质与水文资源综合评价遥感专题报告,地矿部水文地质工程技术方法研究队,1988

神府地区工业水源的红碱淖湖面积,从解放前(I)、50年代(II),60年代(III)到70年代(IV),湖水面积分别从 14.28km^2 、 36.84km^2 、 46.47km^2 扩展到 58.09km^2 。解译依据是图12-1, a所显示的由湖水荡激形成的堤围。



a



b

图 12-1 内蒙红碱淖NE向定向滤波卫星图像(a)与水域扩展期次解译图(b)

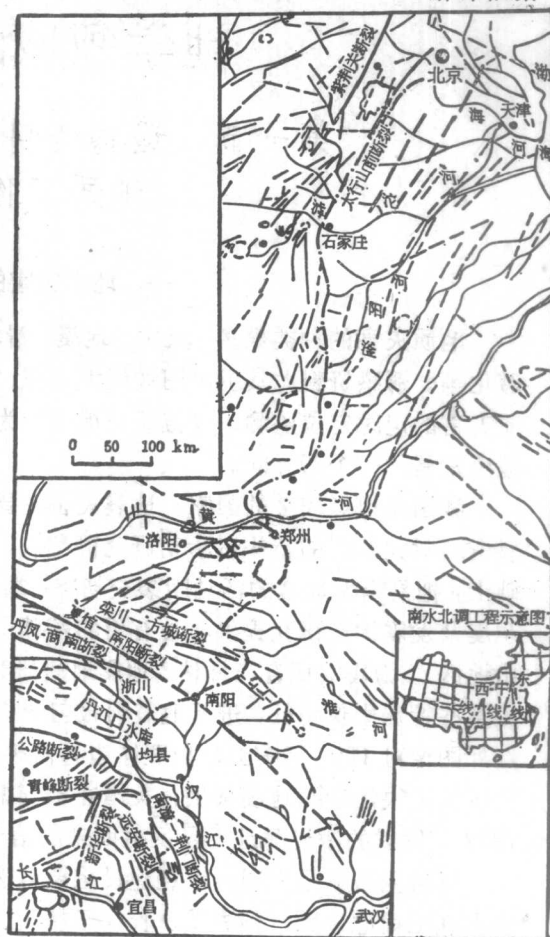


图 12-2 南水北调中线卫星影像解译图
(据长江流域规划办公室勘测科研所, 1981)

对海岸油膜引起的污染监测是遥感环境监测的一个重要内容。一方面是考察沿岸及岛屿间航道的违法排油污或近海油田的油泄漏情况。如美国太平洋沿岸圣巴巴拉海岸, 海洋卫星SIR-A图像水下油泄漏引起亮带; 另一方面是对油膜清污的工作进行监测与效果评价(Sabins, 1987)。紫外波段($0.32-0.38\mu\text{m}$)是测定油膜的最好波段, 强反射浅色调, 能显示厚度只有 0.15mm 的水面油膜。在清水表面的油膜在可见光的绿光波段为暗色调, 反射红外($1.0-1.3\mu\text{m}$)也是高反射亮色调。在热红外波段($10.40-12.50\mu\text{m}$), 清水的热辐射为 17.5°C , 而有油膜时温度为 15.9°C , 相差 1.6°C , 油膜成羽状暗色调条带。

三、工程地质与水文地质遥感

遥感地质在工程地质应用上, 最重要也是最基本的是对重要的水坝、隧道、电站、运河、桥梁、码头以及军事工程设施所在地段的工程地质环境条件的遥感调查。其中地表及

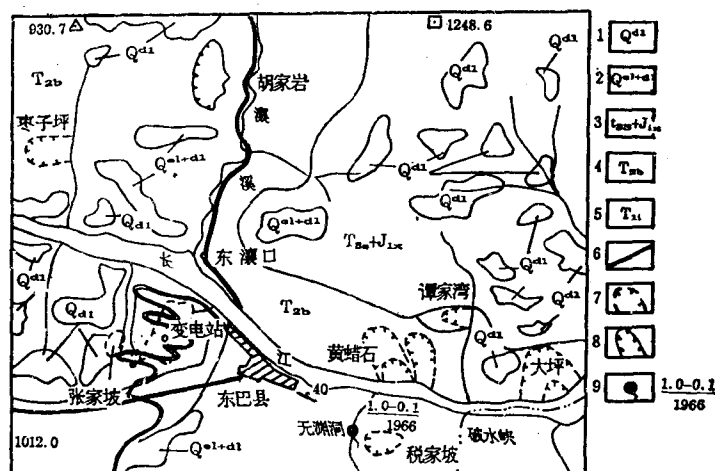


图 12-3 三峡工程库区巴东县环境地质遥感解译图

1:100,000 (据张雅, 1990)

1. Q_{d1} 坡积物; 2. Q_{d1-d2} 坡残积物; 3. T_{2x+J_1} 香溪组及沙镇溪组; 4. T_{2b} 巴东组; 5. T_{1i} 嘉陵江组; 6. 线性断裂构造; 7. 滑坡; 8. 崩塌; 9. 泉流量/观测日期

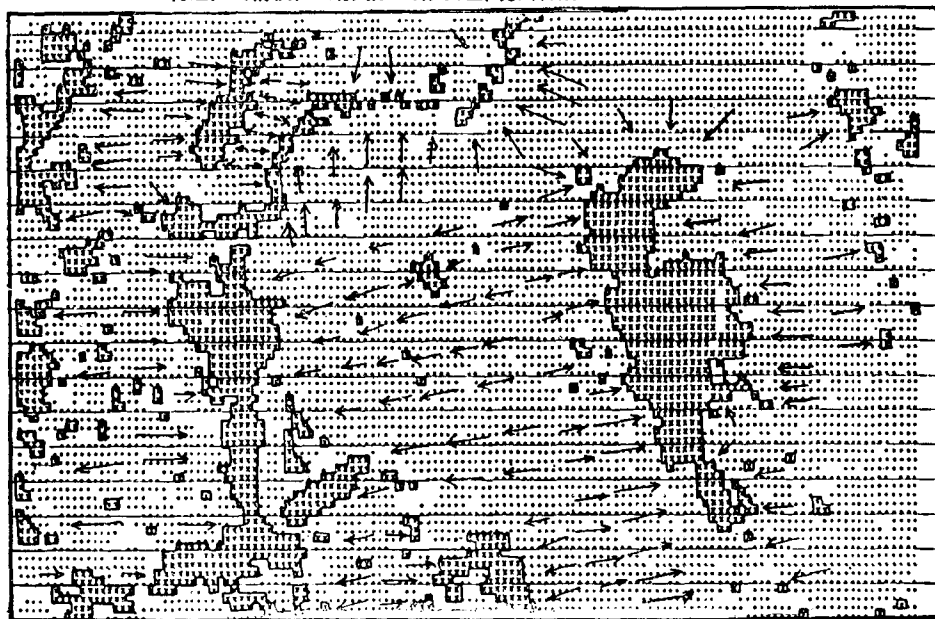


图 12-4 根据陆地卫星资料作出的地下水流向示意图

隐伏活动断裂等构造是主要对象。通过遥感分析来帮助对工区的工程稳定性的评价。图12-2是规划中的南水北调中线调水的路线解译图。工程中另一个应用是铁路、运河等重大工程沿线的地质灾害调查与分析。图12-3是三峡水库建设的地质灾害调查资料。此外有象岩溶地区和矿山采空地区的地面塌陷调查及与工程地质有关的地下水害调查等。可见, 工程地质遥感工作, 实际上就是新构造、灾害地质等遥感解译分析资料的应用。

地下水的存在会引起土壤表面及植被的温度或辐射强度两种变化。土壤中水份增加, 热传导增加, 热容量变化, 水份的蒸发造成地面降温, 故白天在热红外图像上呈现冷异常(色调变暗)。浅层地下水的缺失会引起上部植被的生态变化。遥感技术在水文地质方面

的应用有：①对岩性、构造和各种地貌形态的含水特点、含水性好坏分析。如对古河道的遥感解译，在我国华北、天津市等地都有成功经验。岩溶水文地质研究，崔承禹等人（1985）对广西漓江桂林、阳朔地段利用夜航成像的热红外图像，查明地下水流出地面再流入漓江，对地下河的排泄地段，对河流的补给，泉水的出露等。②直接或间接探测泉水及浅层地下水。我国李承尊（1985）对大连地区岸边的泉水遥感解译，美国在夏威夷群岛海岸边对地下淡水流入海中位置的确定。③对一些水文地质特征的研究。如A.G.Bobba等人（1992）用冬夏两个时相陆地卫星数字处理图像来检测补给区及溢出区的地下潜流及潜水的流向图（图12-4）。利用遥感资料来分析矿区水文地质条件，孙仲安等人（1990）用SAR图像来分析京西煤田地区水文地质，分别对平原地区及基岩地区的遥感地质应用进行评价。《遥感原理和工程地质解译》一书（卓宝熙等，1982），对各种类型地下水（如孔隙、裂隙水等）的解译标志有较详细介绍。

第二节 遥感技术在国土资源调查及城市规划工作中的应用

一、太原幅农业自然条件目视解译系列图

这项工作由山西省与北京大学等8所高等院校于1981年合作完成。它以陆地卫星遥感图像作为统一信息源，进行了中小比例尺多学科系列制图试验，编制了《陆地卫星像片太原幅农业自然条件目视解译系列图》，共有17幅专题图，包括影像图、影像地图、地质、地貌、水系、水文下垫面、土壤、土壤侵蚀、土地利用、森林、牧草地、农业气候区划、农业自然区划、农业生产条件等各专业解译图。采用影像地图形式把专题解译图成果转绘到经几何校正统一比例尺（1：50万）的卫片底图上，以保证成图精度，采用多种光学处理和信息特征提取技术，同时运用影像与地学分析方法，取得较好综合研究效果。

二、遥感在内蒙古草场调查中的应用研究

我国天然草场面积约400万km²，占国土总面积的41%，是重要的再生资源。近30年来对草场资源利用强度日增，不少草地因过度开发，引起草场退化、沙化与环境变劣。为使牧区经济稳定、持续发展，加强草原资源保护、管理与监测，及时了解草场现状及动态变化。内蒙古自治区天然草场面积占全国的20%，是我国主要草原牧区。1983—1988年开展全区草场资源遥感调查是“六五”科研项目。其特点是：①应用卫星遥感技术进行快速草场资源调查，比常规方法更为及时和精确。②卫星遥感图像的多波段、多种信息复合，使草场资源和环境条件研究的深度和广度显著提高。使资源调查定量与定位相结合完成了各盟市1：35万（成图1：50万）及全区1：100万（印刷图1：150万）系列资源地图，包括地貌、土壤、植被、水资源、气候类型、土地利用及生态分区等多种专题地图。它把专题

图与资源数据结合在一起,满足了各盟市及全区农业自然资源调查、农业区划、生产布局、资源管理与国土整治的需要。③内蒙遥感以卫星遥感为主,遥感方法与其他常规方法配合,多学科协同攻关,草地生态专业和遥感技术科研人员密切配合,取得了较高水平的研究成果。

三、城市遥感工作中的应用

80年代以来,我国许多大中城市先后都开展遥感调查研究工作,已逐步形成一门新学科“城市遥感”。北京、天津、广州、上海、沈阳、武汉等城市相继开展类似工作,一些沿海沿江重要城市正在开展航空遥感与航天遥感相结合的调查研究工作,它们的共同特点是:针对各城市建设发展中存在的问题开展工作,如城市大气污染、水质污染、环境质量、城市交通、城市土地利用和规划等。现以北京市航空遥感综合调查应用为例简述如下:

北京市的城市遥感始于1983年,在规划市区980平方公里范围内作了多片种航空飞行,如①1:18000彩红外航摄,可为城市绿地覆盖率测算和解译以及大气污染的植被效应(放大成1:5000—1:2000)应用;②1:10000天然彩色航空摄影,主要为农、林及水质污染应用;③1:5000黑白航空像片是专门为交通车流量研究而飞行的。航摄时间选在交通拥挤的早高峰时间(7:30—8:30);④1:16000航空热红外扫描飞行,主要用于水体热污染、冬季城市热场调查、工厂和楼群的热泄漏调查等方面应用。共有41个课题,包括11个方面,其中许多课题很有特色,如北京长城的研究、北京城市热场调查,北京固体废物调查,北京污染源烟囱的调查,北京交通流量的调查,北京城市1953—1959,1983年发展的调查,北京大气污染对植被影响调查。有关城市地质环境的课题有:北京城市地基稳定性与地质构造研究,北京第四纪与古河道沉积,北京的冰川地貌,北京的泥石流,北京的建筑材料与矿产资源等。都各有特色,内容详尽,信息丰富,许多成果为第一次取得资料,为我国以后许多城市遥感工作所借鉴。

第三节 遥感技术在土壤、植被、旅游资源与考古工作中的应用

一、植被、土壤方面的遥感应用

(一) 植被和林业遥感工作中的应用

70年代航天遥感的发展,对中国这样国土广阔、资源不清的发展中国家十分有用。林业部门也很重视,曾利用MSS、TM、SPOT卫星资料在我国南方、东北、西北林区进行资源调查试验,我国“七五”科学技术规划,专门列出了“三北”防护林遥感工程项目,全面对东北、华北、西北的森林草原和戈壁荒漠的各种植被类型及其土地潜力进行遥感和地面综合调查,以便为解决森林立地条件、草原与载畜量、人口承载能力等问题提供科

学依据。遥感的宏观、真实、快速、多波段、多时相为解决这一问题提供了有利条件。为了统一步调、统一认识,在大面积开始工作前训练干部、制定规范、探索一条切实可行的遥感调查方法,于1986年6月选择河北省承德地区平泉县作为公共试验区,集中37个单位近百名科技人员,用近两年时间完成了“三北防护林遥感综合调查技术规程”,编制出版了专题系列图。

平泉试验对多种遥感图像(MSS、TM、SPOT卫星的HRV图像),我国的国土卫星图像以及多种比例尺(1:13万、1:7.5万、1:3万)彩红外航空像片都进行了试验,并对其经济综合技术进行评估,资料匹配的合理性和丰富程度在国内遥感工作中是空前的。

在利用超小比例尺(1:13万)彩色航空像片对植被的分类在国内尚属首次,取得了满意效果。1:13万航片可放大为1:5000的航片使用,能分辨1—2m的地物,对刺槐、油松、杨树、农田、草地、果园有很好的区分能力。

植被的遥感研究不仅可用于植被类型划分,而且已进一步研究其季节变化、动态变化、作物估产,充分利用多时相的优势对小麦、水稻、棉花、大豆等作物预报产量。我国已在河南、河北、北京、天津、黄淮海平原的313个县市开展了小麦估产工作(徐希儒,1991)。

(二) 土壤遥感研究

1980年全国土壤普查中应用遥感技术,不仅提高了精度,而且节省人力财力,取得可喜成果。随后开展县级土壤普查,要求更加精细,各县多采用航空像片。一般土壤解译多是结合地形、地质、植被、水文、土地利用等资料,进行多因子分析,特别是中小比例尺用卫星影像作土壤解译和制图,更是如此。山西大同幅的土壤解译,就充分利用环境因素以及土壤地理学的优势,克服卫星图像上土壤显示的弱点。实验证明,以秋季影像最佳,可解译性大。山西农业遥感对全省1:25万土壤解译图作了评估,认为土壤解译率可达95%。我国许多地区都用遥感方法调查土壤和编制土壤类型图,土壤调查的遥感应用也从静态向动态研究方向发展。李天杰等人对晋北盆地盐碱土的水盐运动,用卫星遥感技术、数字模拟、常规调查与地理信息系统结合,达到对水盐运动监测和预测的目的。

二、在旅游资源调查和考古工作中的应用

(一) 遥感应用于旅游资源的调查

该项工作是为适应近些年我国旅游业发展的需要,开展名山风景资源的调查。1988年对泰山的调查(李寿深,1991),利用1:10000天然彩色航空像片编制了1:25000“泰山风景资源图”。利用航片分辨率高、立体感强、视域广阔的优点,对泰山500m丘陵区的战国古长城的调查,可资观赏游览的孤峰陡崖、溪流、瀑布等风景地貌的分布,以及对风景林、古树、古建筑、古桥的清查都具有优越性。随着旅游业的发展,风景资源的遥感调查是节省人力物力、提高效率、提高精度的重要途径。

(二) 遥感在考古工作中的应用

近年来遥感在考古工作中的应用发展迅速。古长城的研究既是一种考古工作,也是旅游资源的调查。城市研究中对古城址的考证,城市的起源等多有应用。严格地说,这类考古工作应属于历史地理的范畴。近年“长江中下游遥感综合调查”项目中对长江沿岸黄石、九江、安庆、芜湖等城市的形成发展,于希贤等(1990)用遥感方法进行了研究。

这项工作中对古彭蠡泽的考证借助遥感图像增强处理,可以看到长江主航道由北向南移动,证实了谭其骧教授考释古长江主航道在武穴、黄梅、宿松、安庆一线,而今彭蠡泽消失,只余滨江众多湖泊(龙感湖、大官湖等)的论述。

第四节 天体遥感的地质研究

对月球及行星的研究是人类探索太阳系及地球起源的重要内容。遥感成像技术对这些天体研究作出许多其他学科无法取代的贡献。美国宇航局(NASA)、欧洲空间局(ESA)、日本等国都拟定探测宇宙空间的计划。

1967年7月20日美国阿波罗-11号飞船登月成功,是人类第一次踏上另一个星球。几次登月,取回50kg月岩。鉴定出组成月面的是玄武岩、斜长岩及玻璃角砾岩。同位素测定为46.5亿年。测得月面昼间温度为120—150℃,夜间为160—180℃。进行了月震研究。根据卫星拍摄的图像,制成月球图发表在“美国地理”杂志上。从而大大丰富了人类对月球的知识,排除了认为月球是地球分离出去的假说。

1974年水手10号宇宙飞船,收集到2000多张有关水星的彩色图像,研究表明:水星表面和月球相似,为一层细粒浮土,岩石以玄武岩为主,也有大量的环形山和冲击坑。表面温度最高可达430℃,最低为零下130℃。水星有磁场,并绘制了水星磁场图。

1967年10月17日苏联的金星4号在金星上软着陆。1978年美国的“先驱者”金星1号、2号先后到达金星轨道。金星1号绕飞243天,取得40%金星表面的雷达图像。探测证明:
①金星浓密的大气层含大量氫和氖,比地球含量高200—300倍。②表面温度高达485℃,因而不可能有生命。③金星表面环形山很少、表面浮土呈桔黄色。测得一条大裂谷,长1400km,宽280km,深5000m,赤道附近有两座巨大火山峰和许多圆形火山口,被认为有火山活动。

除地球、月球外,各行星中火星获得的遥感资料最丰富。1976年美国的“海盗”1号、2号分别得到大量火星遥感图像,几乎覆盖整个火星表面,并已镶嵌成图。研究结果表明:
①火星与地球颇多类似,现今已没有水,只看到有干涸河床和细小支流侵蚀迹象,推测在30亿到1亿年前火星上有过水。②火星表面环形山众多,表面砖红色细粉末浮土经常形成烟尘滚滚的尘暴。“海盗”号发射的着陆舱取得表土样品分析表明,样土中没有有机物。③火星大气成分主要为CO₂,只有微量H和O及水汽,赤道中午最高温27.3℃,南极极冠处最低温度零下123℃,白色极冠为冻结的CO₂。④火星有两个很小的卫星,直径最大的只有27公里。

“旅行者”1号、2号宇宙飞船,于1979年3月以来掠过木星、土星、天王星、海王星和冥王星,正向太空深处飞去,预计147000年以后,可达另一恒星系。探测资料表明,土星、天王星的卫星分别比原来增加了7个和10个,土星光环由5个增加到7个,有23个卫星。对木星的16颗卫星中的5颗进行了探测,得到大量遥感图像,新发现木星也有光环。木卫1上火山活动十分活跃,至少看到8个火山口正在喷发,喷发高达420km(图版9)。

上述资料表明,遥感技术可以取得别的观测手段无法获得的天体影像资料,这些资料大大加深了人类对天体的认识。而这些认识对回答和研究象地球和太阳系的形成这样一些重大地球科学问题又是必不可少的。

第十三章 地理信息系统及其应用

第一节 地理信息系统的概念与系统构成

一、概 念

地理信息系统简称GIS (Geographical Information System), 是综合处理和分析空间数据的一种技术系统。在计算机硬件支持下, 该系统对描述(与地学有关的)外部客体的各种数据具有按一定地理坐标进行输入、存储、更新、检索、量测、运算、分析处理、图形显示等功能。是一个能为地学研究(科学)决策服务的技术系统。从它的多种英文名称: Geo-base Information System (地学基本信息系统)、Natural Resource Information System (自然资源信息系统)、Geo-data System (地学数据系统)、Spatial Information System (空间信息系统)可见, 它的服务对象包括地理科学、自然资源管理和监测、景观生态管理、全国或地区国土整治、土地信息系统、土木工程和水利设施设计以及与地质密切有关的油气、矿产资源勘查等, 并在区域地质调查研究, 灾害地质分析领域得到推广。近年来GIS在地学领域发展迅速, 故对它的构成与应用作简单介绍。

二、系统构成

地理信息系统主要是由GIS的硬件、软件、地理数据(库)和系统的管理操作人员四个部分组成。

GIS硬件主要是微型或中小型计算机或大型计算机工作站, 目前具有从中小型机向工作站发展的趋势。GIS必备的外部设备有数字化仪、打印机及绘图仪。可选设备有扫描仪、激光绘图仪/打印机、磁带机、图像板、彩色喷墨等。

地理空间数据是指以地球表面空间位置作为参照系的各种景观数据(如自然的、社会的、人文经济的等)。这些数据可以是图形、图像、文字、表格和数字等形式, 由系统的建立者通过有关的量化工具和介质输入GIS是系统程序作用的对象, 是GIS所表达的现实世界经过模型抽象的实质性内容。

早期的GIS一直是以各种类型的地图作为主要的数据源。随着遥感技术的兴起, 遥感信息以其周期性、动态性、信息丰富、获取效率高并可直接以数字方式记录传送等优点成为重要的GIS信息源和数据更新手段。遥感与GIS的结合是空间技术发展的趋势。

系统开发、管理和使用人员是GIS的重要构成因素。因为GIS是一个动态的地理模型, 光有系统软硬件和数据不能构成完整的GIS, 需要由人进行系统的组织、管理、维护和数据更新, 使系统不断得到完善, 并合理使用地理分析模型提取多种信息, 为研究和决策服务。

GIS软件是GIS技术的核心, 它既是GIS技术的集中体现, 又是这一技术的应用基础。一般商品化产品, 如美国的ARC/INFO系统, 主要是由数据采集、数据管理、数据分析、数据转换和数据输出五部分构成。

(一) 数据采集

其功能是完成地学数据采集与输入工作,可用扫描仪、数字化仪、图形终端或其它系统的磁盘数据文件输入。主要的信息源有:专题地图(包括地形图)、统计表格、遥感影像、实测数据以及其它系统的数据文件。

数据采集方式主要有以下几种:①手工式,是早期和试验时采用的方法,效率和精度均低;②手扶跟踪数字化,是当前最有效的地图数字化方式,在手扶跟踪数字化仪和数字化板支持下进行。通过这种方式可得到矢量格式的地图数字化数据;③自动扫描,是最有前途的数字化方式。由扫描仪进行,扫描仪可以每英寸300、400或600点(线)采集地图或影像的灰度或颜色,形成点阵像元数据或多波段数据;④数据通讯,是在联网方式下获取有关的其它信息系统的一种方式。无论用何种方式采集,其目的都是要把数据源变为GIS可以存贮管理和分析的形式。

(二) 数据管理

其功能是实现空间(几何)数据和属性(非几何)数据的存储、检索、查询、编辑、修改。GIS与其它信息系统最大的不同之处是对空间数据的管理。如何实现空间数据与属性数据的统一存储、检索、查询、编辑、修改是评价GIS的一个重要方面。

一个功能强大的GIS产品能够提供一个统一的空间数据库管理系统,提供各种范围内的双向查询、编辑、建模功能,允许快速地修正并更新空间数据及有关的描述数据。例如,最新推出的System 9,它使用一个优化的、面向目标的数据库管理系统,可以快速地存取大型关系文件,它把现实物体的空间关系、特征和属性存储在同一个网络分布式关系数据库中,所以作图,拓扑数据结构是这种数据模型的特征。

(三) 数据分析

数据分析部分借助地学模型(予置式模型或用户自定义模型),完成地理数据的分析和计算工作,是GIS的核心内容。目前比较成熟的分析功能有:地面数字高程模型、网络分析模型、邻近分析模型、区域分析模型、拓扑分析模型、以及空间距离搜索模型等。

数字地面模型(DTM)在自然地理、地貌、水利、工程设计、管道布线等领域有着广泛的应用。当地图被数字化后,利用等高线通过插值可以生成数字地面高程模型(DEM),并由DEM进一步产生坡度、坡向、沟谷、山脊、地表粗糙度等12个地形要素,构成DTM数据。利用这些地表信息与植被、土壤、人文要素的相关性,可建立不同的地学应用模型。

网络分析模型在经济地理、市场分析、交通管理等领域有着广泛的应用。此模型根据网络拓扑性质,可以在两点间选择最短路径,并绘出其长度和有关信息,也可以比较各个市场中心服务范围和影响区域。

定距离空间搜索(Buffer)模型和邻近区域分析模型在区域规划、国土整治、土地管理等领域有着广泛的应用。通过指定空间搜索距离,用户可以方便地进行空间检索、查询,了解在一定范围内地理现象的空间分布;通过邻近区域分析模型,用户可方便地进行邻近区域检索、查询、了解区域周围的环境情况。由于用模式来定义表,表和空间数据联系在一起,这样用户能进行集成的空间和属性处理、报表生成、专栏处理、属性标记和相互作用的属性修改、更新等项内容。

点、线、多边形是GIS图形数据的基本单元,与之相应的拓扑分析模型在自然资源管

理、生态评价、土地评价和规划等领域有着广泛的应用。它通过多幅专题图或专题图与图像合并办法,生成新的专题图及新的属性表,为运用不同评价和规划模型,完成地理信息的分析和地理数据的计算提供了极大方便。

上述系统底层通用分析模型仅提供了某些数据分析的工具。在具体应用领域还需结合专业知识和实际要求建立用户的应用模型。

(四) 数据转换

是提供不同空间数据集的集成途径。空间数据都是用矢量和网格(栅格)格式进行采集、存贮和处理的。矢量结构的数据更能表达我们的空间想象,因此它最常用于手工的数据采集。但是,数据自动采集方式往往产生与计算机的规则结构相匹配的栅格结构数据。因此,现代GIS应兼容矢量和栅格两种数据格式,提供多种方法进行两种数据的相互转换,满足多源信息综合分析的需求。

(五) 数据输出

数据输出部分将GIS信息或分析结果以可视的形式表示,如屏幕,绘图仪、打印机输出等。系统同时支持软硬件拷贝显示,使用户能够获得在屏幕上所见结果,即在地图成图之前,用户能预先看到硬拷贝输出的图形。用户还可以在图形窗口内编辑地图,包括彩色设计,图廓整饰、生成比例尺、注记、图例、表格、公里网格等,最后由绘图仪/打印机输出。

第二节 GIS在地质学中的应用

石油和矿产勘查要求多种数据集进行综合分析。过去对数据存档、检索及迭加分析通常使用图件或表格数据,对比与综合要花费大量时间,遥感与GIS技术则为这些多源勘探数据综合处理提供了现代化手段。

在石油等矿产勘查时,地质学家首先要对各种地质图件、地球物理和地球化学数据、地震剖面以及遥感图像等数据进行综合分析,以便能清楚地了解各种不同数据集之间的关系。

地质数据通常也是由点、线、多边形三种形态构成的。点数据以地球化学分析数据最典型,它与某一特定的取样点有关;线数据可以是一条岩性分界线或一条断裂;多边形数据如某种岩类的出露范围。这些数据,有的采用图件形式,用颜色表示岩石类型(专题图),符号表示地球化学取样点位置,用等值线表示磁场测量值。许多地质数据还以报告、图形或实验室结果表格等形式提供。在GIS中,这些不同的数据集(如地球化学分析数据、航磁调查数据、地震数据、地质图和地形图以及遥感数据)经过数字化、编码、矢量到网格数据转换,产生连续或离散的数据集,存入建立起目标区的地质数据库,图13-1给出了地质地表数据的输入,分析和建库的过程。

在地质数据库中,地质数据按专题内容分层存贮,几何特征以图形图像表达,属性数据则记录在二维关系表中,两者为一对一或一对多的关系。于是,在这个数据模型的基础上,勘探工作区的所有地球物理、地球化学、岩石学及辐射场的数据都可以纳入数据库。一旦工作区的地质数据库被建立,地质学家便可以利用已有的专家(概念)模型来指导数据分析。例如,在石油勘探中,首先利用石油存贮条件与变量之间已知的物理、化学和地

质联系来分析数据库提供的数据库，对直接或间接与这些联系有关的数据进行分析、处理、生成各种派生数据。表13-1显示某工作区地质数据库中的原始数据和派生数据集。用这些数据所提供的信息来选定油气储藏有利地区。

如将重力和航磁数据叠合，有助于对基底形态的分析。又由于基底形态对沉积盖层构造发育有影响，因而据重力和航磁的一阶、二阶导数可推断出构造的总体特征。又如，基底隆起地区可能影响盖层构造特征，基底凹陷的地区沉积厚度较大，可能成为盆地的沉积中心。

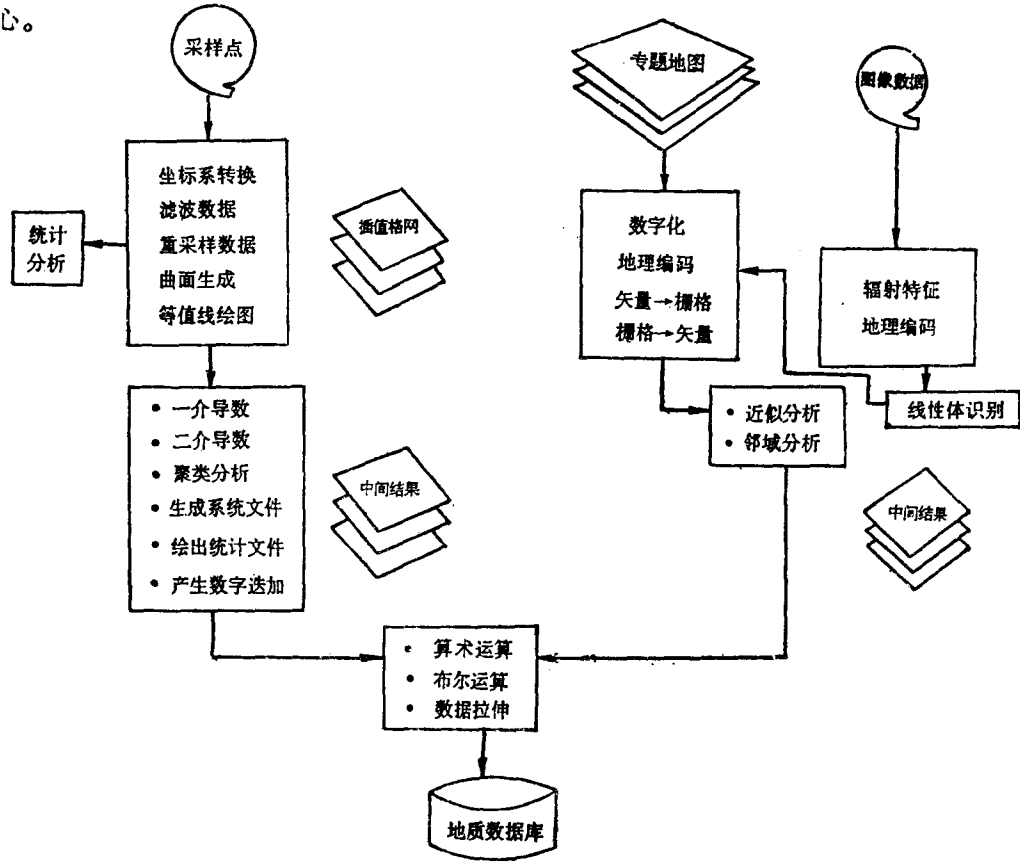


图 13-1 地质地表数据处理、分析及建库流程图

背斜构造是重要储油构造。是油气勘探数据库的重要内容。构造的向下延伸范围是一个最有价值的参数，目前的技术水平还难以确定。在数据库中，背斜用多边形表示，并以背斜轴为中心向下延展来定性表达背斜的地下影响范围。

断层对油气的生、储、盖都很重要。断层等密度图与线性体等密度图是用任一网格单元范围内断层/线性体出现的频数来定义的。用邻域分析法计的研究区内围绕每一象元的 5×5 象元阵列中断层出现的次数。结果图显示出断层/线性体密度。将断层等密度和线性体等密度图进行叠加，合成出一幅描述断裂密度的新图。对盖层断裂密度高值地区进行分析，判明它对区域油气运移和储集的具体作用。

表13-2给出某研究区域模型及其对应的权重，系统据此运行后生成一个新图像。图像的像元值等于各输入的权值求和，将它们进一步分段，便可以表达工作区中油气产出有利

表 13-1 原始和派生地质数据

原始数据集	派 生 数 据 集
岩 性	各岩性单元放射性数据的统计文件
构 造	与背斜轴的接近程度, 断层密度(存在条数)
线性体	线性体密度(存在条数) 线性体与断层的综合密度
重 力	一阶导数 二阶导数 一阶和二阶导数值高的图形边界
航 磁	一阶导数 二阶导数 一阶和二阶导数值高的图形边界
放射性 eu, eTh, k, eTh, k, eu,	eu, eTh, k 的分类图

表 13-2 模型的输入与数字加权

输 入 的 数 据 集	数据集的权(分)
重力和航磁微商都高的多边形	10
重力和航磁微商有一个高的多边形	7
背斜构造	5
断裂密度	3
岩性	
• 二叠系	1
• 三叠系与下侏罗系	2
• 上侏罗系, 白垩系和第三系	3

性的不同级别, 最后圈出高概率产油区。

这种技术方法同样适用于其它矿产勘查、区域成矿预测, 工程地质灾害评估与预测等。

GIS技术的引入可能极大改变地质学家的工作模式, 使地学工作者面临的对多源地质数据的采集、配准、存储、分析、综合与检索工作, 变得形象直观、灵活多样、快速准确, 使各种地学模型的生成和发展, 在技术上有了主要的支撑系统。

主要参考文献

1. 陈述彭, 1990, 遥感大辞典, 科学出版社。
2. 陈述彭、赵英时, 1990, 遥感地学分析, 测绘出版社。
3. 陈华慧, 1984, 遥感地质学, 地质出版社。
4. 朱亮璞等, 1981, 遥感图像地质解译教程, 地质出版社。
5. 吕斯骅, 1981, 遥感物理基础, 商务印书馆。
6. 马蔼乃, 1984, 遥感概论, 科学出版社。
7. 张樵英, 1986, 遥感图像目视地质解译教程, 地质出版社。
8. 庄培仁、赵不亿, 1984, 遥感技术及地质应用研究, 地质出版社。
9. 丰茂森, 1992, 遥感图像数字处理, 地质出版社。
10. 王润生等, 1992, 地质勘查图像分析与综合, 地质出版社。
11. 卓宝熙等, 1982, 遥感原理和工程地质解译, 中国铁道出版社。
12. F. 萨宾, 杨廷槐等译, 1981, 遥感原理及解译, 地质出版社。
13. 国家地质总局航空物探大队遥感室, 1978, 地球资源卫星像片图集。
14. 国家地震局地震研究所、地质研究所, 1982, 中国活动构造典型卫星影像集, 地震出版社。
15. 地质矿产部地质遥感中心, 1988, 航空热红外遥感图像集, 地质出版社。
16. F.F. Sabins, 1986, Remote Sensing Principles and Interpretation, Second Edition, W. H. Freeman & Company, New York.
17. B. S. Siegal and A. R. Gillespie, 1980, Remote Sensing in Geology, John Wiley & Sons, New York.

第二章参考文献

1. 孙星和, 1990, 宇航遥感物理基础, 地震出版社。
2. 王宇明, 1991, 遥感技术及其应用, 人民交通出版社。
3. 汪国铎等, 1989, 微波遥感, 电子工业出版社。
4. 杨凯等, 1988, 遥感图像处理原理和方法, 测绘出版社。
5. [美] P. H. 斯韦恩等, 1984, 遥感定量方法, 科学出版社。
6. 濮静娟, 1992, 遥感图像目视解译原理与方法, 中国科学技术出版社。
7. 童庆禧等, 1990, 中国典型地物波谱及其特征分析, 科学出版社。
8. James B. Campbell, 1987, Introduction to Remote Sensing.

第三章参考文献

1. 华瑞林, 1990, 遥感制图, 南京大学出版社。
2. 韩心志, 1991, 航天多光谱遥感, 宇航出版社。
3. 日本遥感学会, 龚军译, 1981, 遥感原理概要, 科学出版社。
4. 潘时祥, 1990, 像片判读, 解放军出版社。
5. 阎守邕、童庆禧编译, 1980, 地球资源技术卫星, 科学出版社。
6. 美国地质调查局、美国大气海洋局, 1984, 王新民、戴自圻等译, 陆地卫星4/5数据用户手册, 科学出版社。
7. 谢寿生、徐永进, 1987, 微波遥感技术与应用, 电子工业出版社。
8. 郭德方, 1987, 遥感图像的计算机处理和模式识别, 电子工业出版社。
9. 盛浩然, 1979, 航空摄影测量基础知识, 测绘出版社。
10. 刘贤德, 1990, CCD及其应用原理, 华中理工大学出版社。

11. H. J. 沃尔斯, G. G. 阿特里奇著, 1977, 何愚、黄明智、何永庆等译, 基础摄影科学——照相工作原理, 中国电影出版社。
12. 郑兰芬、王晋年, 成像光谱遥感技术及其图像光谱信息提取的分析研究, 环境遥感, 第7卷, 第1期, 1992 (1), p.49~58.
13. J. P. Ford, J. B. Cimino, C. Elachi, 1983, Space Shuttle Columbia Views the World with Imaging Radar, the SIR-A Experiment, NASA, JPL.

第四章参考文献

1. 许殿元、丁树柏, 1990, 遥感图像信息处理, 宇航出版社。
2. 冯纪武、潘菊婷, 1991, 遥感制图, 测绘出版社。
3. 阎守邕、张圣凯等, 1981, 实用遥感图像光学处理方法——相关掩模技术及其应用, 科学出版社。
4. 恽才兴等, 1984, 长江口演变与泥沙扩散, 陆地卫星影像中国地质分析图集, 科学出版社。
5. 林恒章, 1984, 琼州海峡、陆地卫星影像中国地质分析图集, 科学出版社。
6. 赵元洪、张福祥等, 1991, 波段比值的主成分复合在热液蚀变信息提取中的应用, 国土资源遥感, 第3期。
7. 赵元洪等, 1990, 彩色变换及其在浙江括苍山地区的应用研究, 环境遥感, 第1期。

第五章参考文献

1. [美]霍斯特·F·冯·达班特, 1976, 航空地质学, 地质出版社。
2. 承继成, 1987, 遥感信息研究的原理和方法, 北京大学内部出版。
3. Thomas E. A., 1977, Interpretation of Aerial Photographs.

第六章参考文献

1. 南京大学, 1962, 地貌学, 人民出版社。
2. 刘东生等, 1965, 中国的黄土堆积, 科学出版社。
3. 杜恒俭等, 1981, 地貌学及第四纪地质学, 地质出版社。
4. 杨景春, 1985, 地貌学教程, 高等教育出版社。
5. 王长耀, 1985, 空间遥感图像的分析应用, 国防工业出版社。
6. [美]罗伯特·G·里维斯等, 1989, 周卡译, 遥感手册第七分册。
7. 国家地震地质研究所、云南省地震局, 1990, 滇西北地区活动断裂, 地震出版社。
8. 李起彤, 1991, 活动断层及其工程评价, 地震出版社。
9. 江涛等, 1991, 计算机数字图像处理在提取隐伏地质构造信息中的应用, 遥感信息, 1990年第1期。
10. 冯纪武等, 1991, 遥感制图, 测绘出版社。
11. R. H. Thverstappen, 1977, Remote Sensing in Geomorphology, Elsevier Scientific Publishing Company.

第七章参考文献

1. Baird A. K., Journal of Geology, 1984, Vol. 92, p. 344~350.
2. Pontual A, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1989, Vol. 27, No. 6.
3. 傅秀根, 1981, 海南岛航空像片判读文集, 测绘出版社。
4. Way D. S., 1978, Terrain Analysis, Stroudsbury, Pennsylvania, Dowden Hutchinson and Ross.
5. 孟伟, 遥感信息, 1990, No. 1.

6. 崔林生, 遥感信息, 1988, No. 4.
7. Crowley J. K., 1984, Symposium on Remote Sensing of Environment, Third Thematic Conference, Remote Sensing for Exploration Geology, 1984, p. 837~852.
8. Blom R. G., Daily M., IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing, 1982, Vol. GE-20, No. 3.
9. 朱尧璞, 国土资源遥感, 1991, No. 2.
10. 陈昌礼, 国土资源遥感, 1991, No. 2.

第八章参考文献

1. 朱振海, 1991, 油气遥感勘探评价研究, 中国科学技术出版社.
2. 丁家瑞, 1987, 与线性影像有关的一些名词术语刍议, 遥感地质, 1983, 3.
3. 刘允良等, 1992, 剪切带的遥感图像特征研究, 长春地质学院建院40周年科学研究论文集(矿产地质), 吉林科学技术出版社.
4. 杨德明, 1992, 韧性变形带遥感图像特征和航磁异常特征的研究, 长春地质学院学报(河北地质专辑).
5. 于学政, 1985, 世界屋脊周边地区重力滑动构造的卫星影像特征, 遥感地质, 1985, 2.
6. 欧阳成甫等, 1990, 桂林冶金地质学院学报, Vol. 10, No. 4.
7. Robert N. Colwell, 1983, Manual of Remote Sensing, Second Edition, American Society of Photogrammetry.
8. C. P. Lo, 1986, Applied Remote Sensing, University of Georgia.
9. James B. Campbell, 1987, Introduction to Remote Sensing.
10. Victor C. Miller, 1961, Photogeology, M. C. Graw-Hill Book Company, INC.
11. S. A. Drury, 1937, Image Interpretation in Geology.
12. Dr. Ravi Prakash Gupta, 1991, Remote Sensing Geology, Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
13. Hobbs. W. H., 1904, Lineament of the Atlantic Border Region, Geological Society of America Bulletin, Vol. 15, p. 483~506.
14. Cary L. Prost, 1990, Recognizing Thrust Faults on Remote Sensing Images, World Oil, 9, 1990, p. 39-45.
15. David J. Campagna et. al, 1991, The Recognition of Strike-Slip Fault Systems Using Imagery and Presented at the Eighth Thematic Conference on Geologic Remote Sensing, Denver, Colorado, USA.

第九章参考文献

1. 朱振海等, 1991, 油气遥感勘探评价研究, 中国科学技术出版社.
2. D. H. Knepper, 1989, Mapping Hydrothermal Alteration with Landsat Thematic Mapper Data, 28th International Geology Congress, Field Trip Guidebook, T182, p. 13-21.
3. Robert W. M., John Memahon Moore etc., 1986, The Proceedings of the 5th Thematic Conference, Remote Sensing for Exploration Geology, Nevada, p. 373~382.
4. Robert K. V., Peter K. P., Marc L. Wilson, 1984, The Proceedings of the 3rd Thematic Conference, Remote Sensing for Exploration Geology, p. 219~226.
5. 刘燕君, 1991, 遥感找矿的原理和方法, 冶金工业出版社.

第十章参考文献

1. 陈述彭, 1990, 地学的探索第三卷: 遥感应应用, 科学出版社, p 138-141, 124-129.
2. 田国良, 1990, 遥感动态研究, 科学出版社, p.196-260.

3. 许殿元, 1990, 黄河口遥感研究, 气象出版社。
4. 范兆木、郭永盛, 1992, 黄河三角洲沿岸遥感动态分析图集, 海洋出版社。
5. 强祖基等, 1991, 卫星热红外遥感在地震预测中的应用——以中苏边境附近的斋桑泊1990年两次地震为例, 遥感信息, 第3期, p. 25—26。
6. 贾常恭等, 1992, 卫星热红外异常增温与常熟临震前兆, 科学通报, 第9期, p. 821—824。

第十一章参考文献

1. 全国遥感地质工作协调领导小组办公室, 国土资源遥感, 1991, No. 3。
2. 朱尧璞, 国土资源遥感, 1991, No. 2。
3. Guy Rochon Michel Rheault, et al., 1987, 用卫星进行矿产勘查——多源数据的综合协助我们研究拉布拉多地槽远景地, 综合地学信息图像处理译文集。
4. F. P. Miranda等, 1986, Journal of Petroleum Geology, Vol. 9, No. 2。
5. Christopher A. Shuman, 1991, Proceeding of the Eighth Thematic Conference on Geologic Remote Sensing。
6. I. N. Kapustin等, 1983, International Geology Review, Vol. 25, No. 4。
7. D. S. Windeler Jr, 1993, 9th Thematic Conference on Remote Sensing p. 139—149。

第十二章参考文献

1. 徐冠华等, 1988, 再生资源遥感, 科学出版社。
2. 徐希孺, 1991, 环境监测与作物估产的遥感研究论文集, 北京大学出版社。
3. 中国农业工程学会农业遥感专业委员会, 1985, 全国农业遥感第一次学术交流会论文选辑, 农村实用工程技术杂志社。
4. 李寿琛, 1991, 泰山风景资源遥感制图研究, 高校遥感第六届学会论文集, 万国学术出版社。
5. 中科院环境科学委员会等编, 1985, 天津——渤海湾地区环境遥感论文集, 科学出版社。
6. 内蒙古草场资源遥感考察队, 1987, 内蒙古草场资源遥感应用研究, 内蒙古大学出版社。
7. 王长跃等, 1985, 空间遥感图像的分析应用, 国防工业出版社。
8. 国家遥感中心, 遥感信息, 1986—1992, 科学出版社。
9. 丁锡祉, 行星地理学, 四川地理, 1982年, No. 3。
10. Guilandina R. et al., Episoda, 1991, Vol. 14, No. 4, p. 364~365。
11. Bobba A. G. et al., Journal of Hydrology, 1992, Vol. 101, No.1—2, p. 25—62。

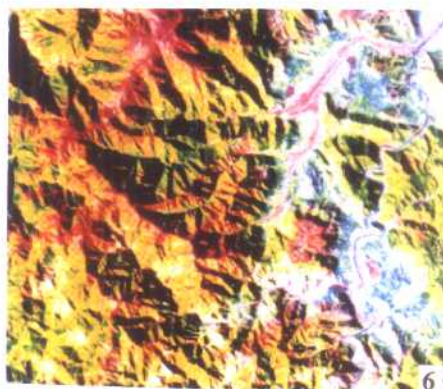
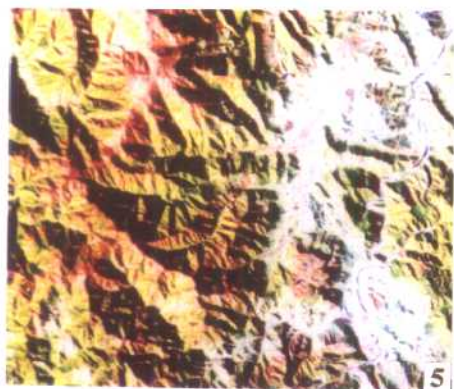
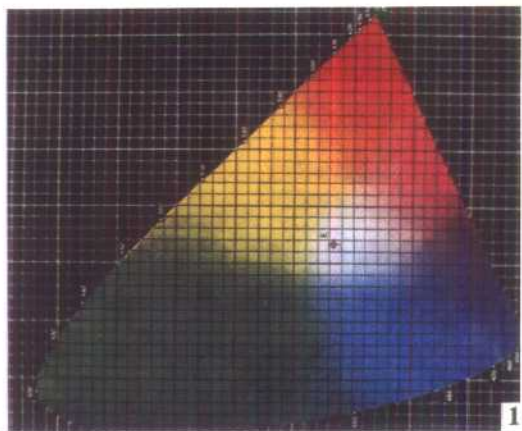
第十三章参考文献

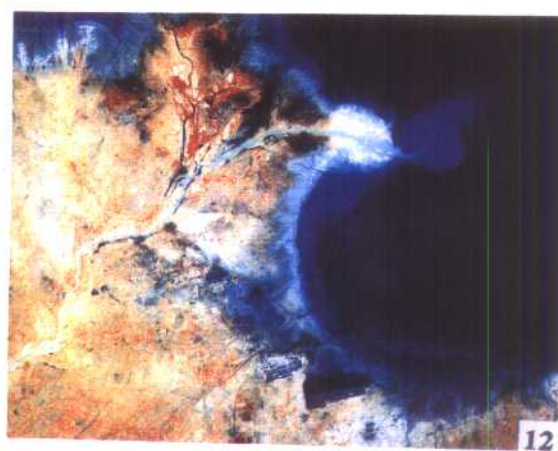
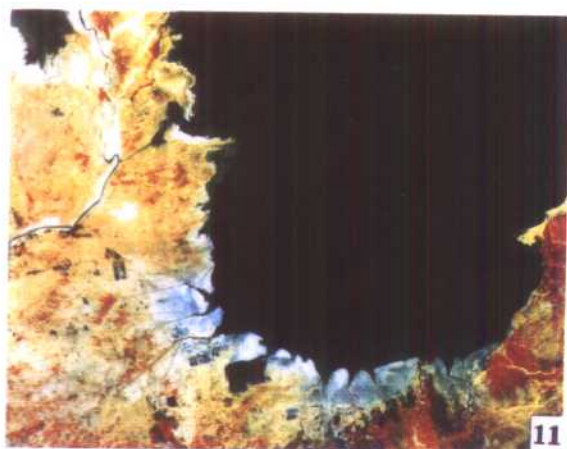
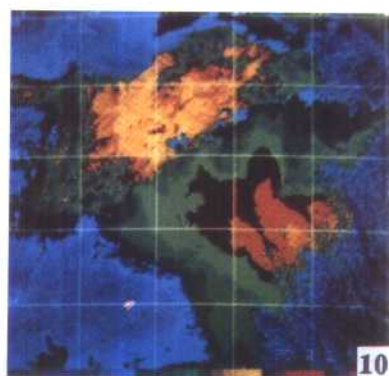
1. Genemap User's Manual, Version 4. 1, December, 1989。
2. 刘承祚, 陈亚光, 1991, 地质专家系统, 海洋出版社。
3. 黄杏元、汤勤, 1989, 地理信息系统概论, 高等教育出版社。

图版说明及图版

1. 彩色色度图
2. 琼州海峡MSS内彩色密度分割图像
3. 安庆幅MSS假彩色合成图像
4. 塔里木盆地MSS数字镶嵌图像
5. 浙江括苍山地区TM542合成图像
6. 图版5经IHS变换彩色增强后的图像
7. 沂沭断裂MSS图像
8. 北非MSS与HCMM之复合图像
9. 木卫一上的火山喷发景观
10. 常熟地震前8天黄海海区NOAA4热红外图像
11. 黄河口1976年MSS图像(范兆木提供)
12. 黄河口1984年MSS图像(范兆木提供)
13. 阿尔泰岩体影像
14. 夏威夷莫纳亚罗火山图像(热红外夜间成像)
15. 美国Goldfield地区比值合成图像
16. 美国Goldfield地区非监督分类图像
17. 湖南香花岭地区成矿预测结果
18. 寺门口串珠状环形构造(彩红外航片楼性满提供)
19. TM与K、U、Th资料复合图像
20. 湖南香花岭雷达与航磁资料复合图像
21. 内蒙某地岩浆带图像(李恭提供)
22. TM图像与线性构造密度资料复合图像(何钟琦提供)
23. 青海柴达木盆地MSS图像
24. 湖南岳阳SAR与TM的复合图像
25. 杭州西湖地区TM2、3、4、5波段直方图
26. 杭州西湖地区TM2波段原始图像
27. 图版26经线性拉伸后的结果
28. 图版26经直方图均衡化处理的结果
29. 杭州西湖地区TM4/TM3比值图像
30. 杭州西湖地区卷积滤波图像
31. 条带状影纹(航片)
32. 网格状影纹(航片)
33. 肋骨状影纹(航片)
34. 链状影纹(航片)
35. 斑点状影纹(丰字型)(航片)
36. 斑块状影纹(航片)
37. 金沙江“V”型谷图像
38. 蛇曲、阶地等河流地貌图像特征
39. 岩溶地貌图像
40. 沙丘、沙链影像
41. 滑坡地貌影像

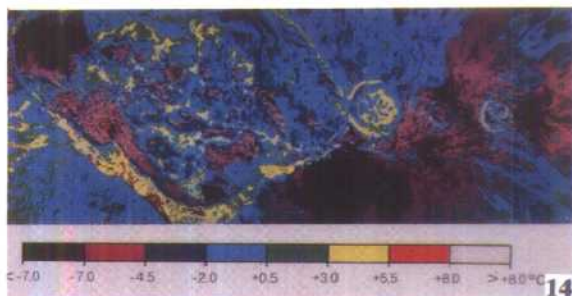
42. 滑坡地貌影像
43. 阿尔及利亚南部某地近水平岩层 (MSS)
44. 直立岩层 (航片)
45. 倾斜岩层 (航片)
46. 褶皱构造航空热红外图像
47. 钩状叠加褶皱 (航片)
48. 变质岩区叠加褶皱 (航片)
49. 沙漠底下的隐伏线性构造 (SIR-A)
50. 压扭性断裂 (MSS7)
51. 紧密型褶皱 (MSS)
52. 宽展型褶皱 (MSS)
53. 平缓型褶皱 (MSS)
54. 横跨褶皱 (MSS)
55. 重力滑动构造 (卫片)
56. 压性断裂破碎带 (卫片)
57. 推覆构造 (Sulaiman山脉, 卫片)
58. 韧性剪切变形和剪切位移
59. 隐伏褶皱构造 (卫片)
60. 隐伏花岗岩体的图像特征 (广西南丹, MSS)
61. 美国Goldfield地区TM5/7比值图像
62. 美国Goldfield地区主组分变换第二组分图像
63. 广西某地泥盆世几种碳酸盐岩的图像特征 (航片)
64. 海南岛北面第四纪玄武岩图像特征 (MSS)
65. 沉积岩图像特征 (航片)
66. 太行山地区变质岩系图像 (航片)
67. 太原西山地区石炭、二叠纪煤系地层热红外航片
68. 岳阳SAR图像
69. 辽宁某地含铀岩体MSS图像 (刘德长提供)
70. 香花岭岩体物探资料与遥感图像复合图 (易昌善提供)
71. MSS阳山幅大东山岩体的图像
72. MSS贵阳幅碳酸盐岩发育区的图像







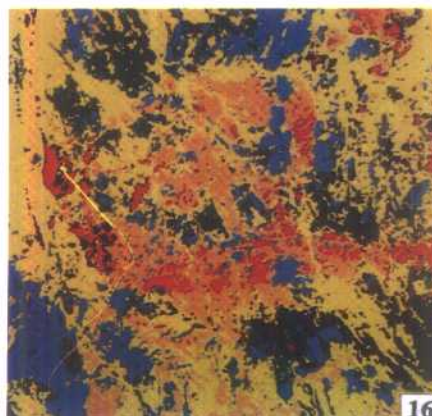
13



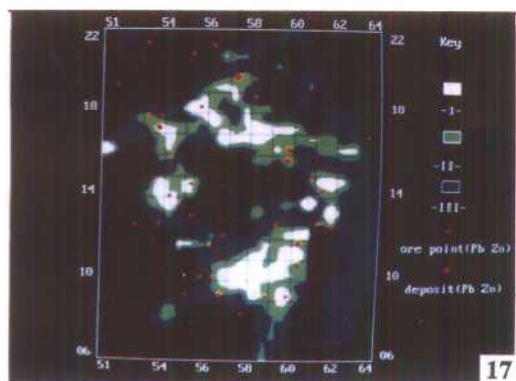
14



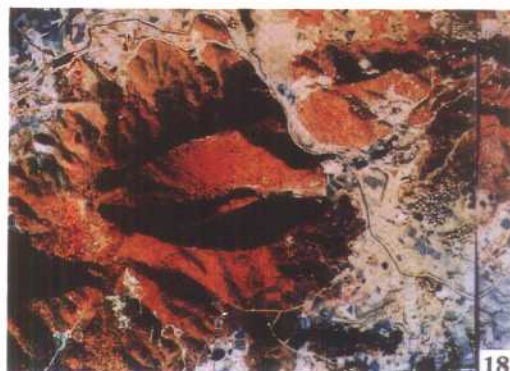
15



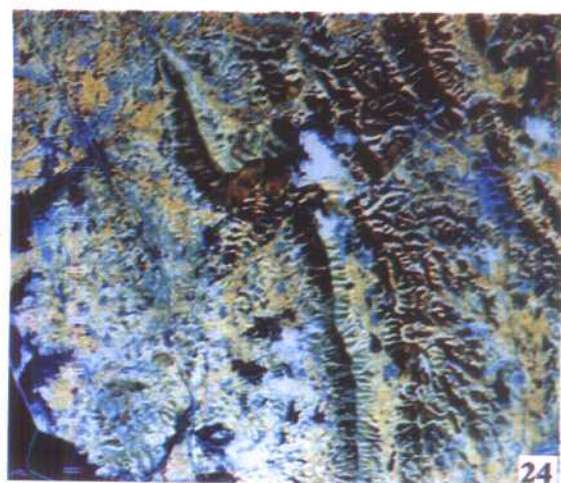
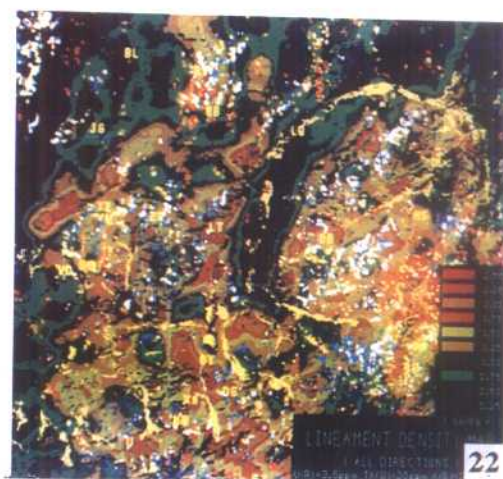
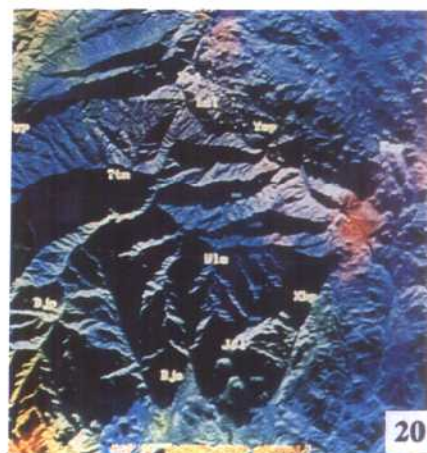
16

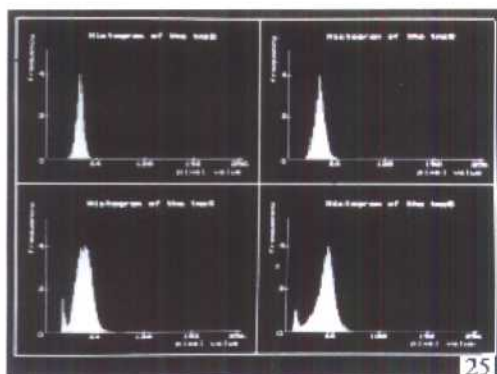


17



18

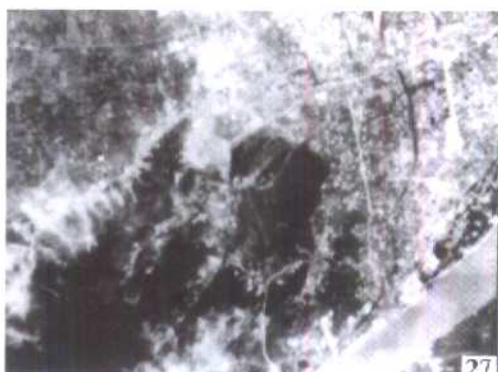




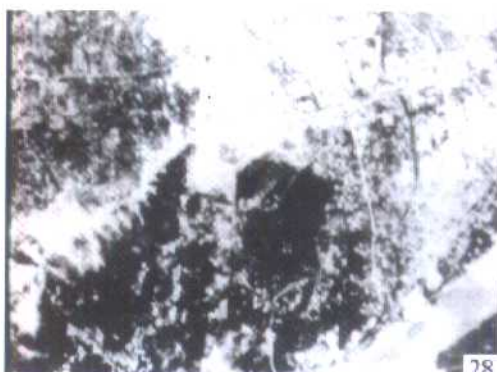
25



26



27



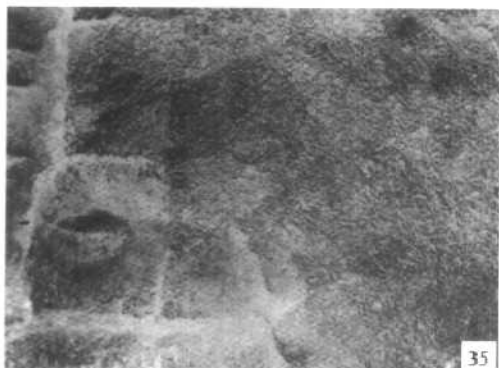
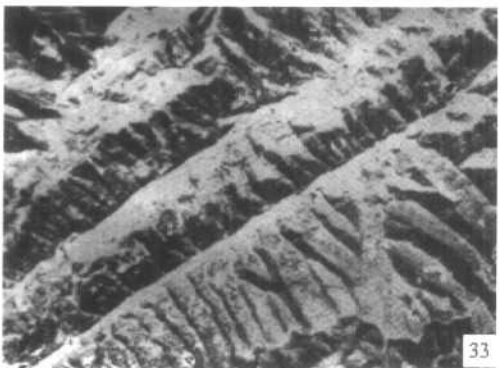
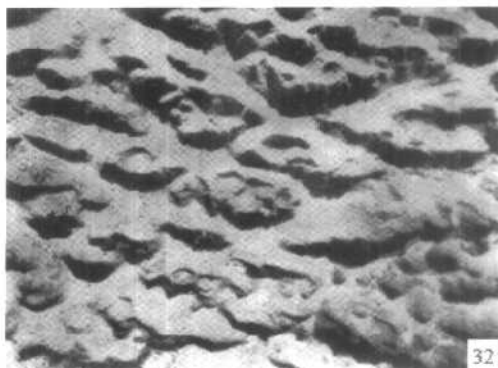
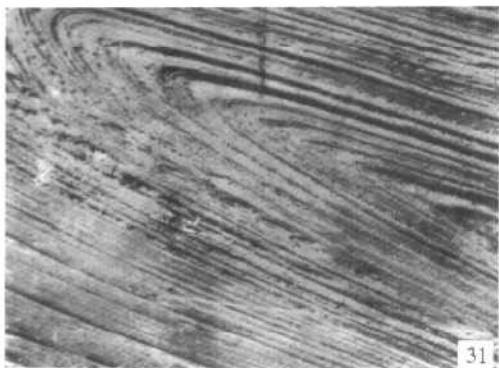
28

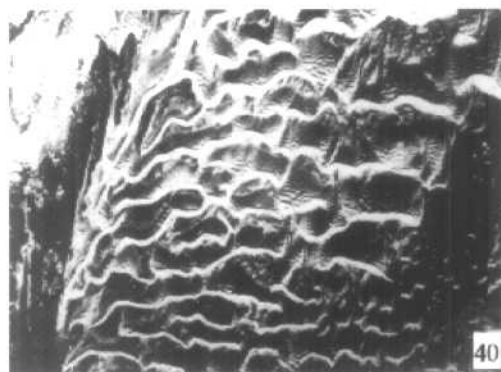
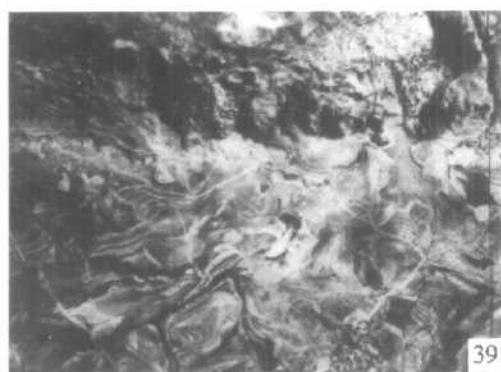


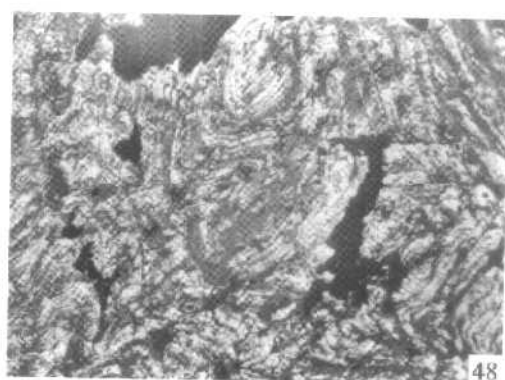
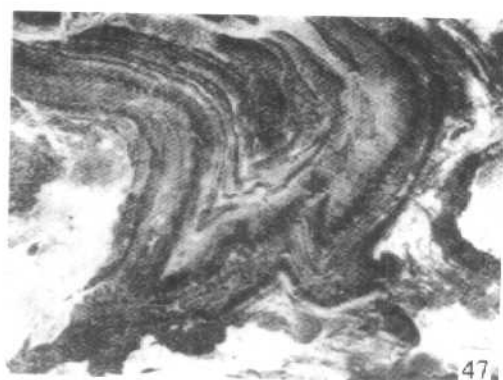
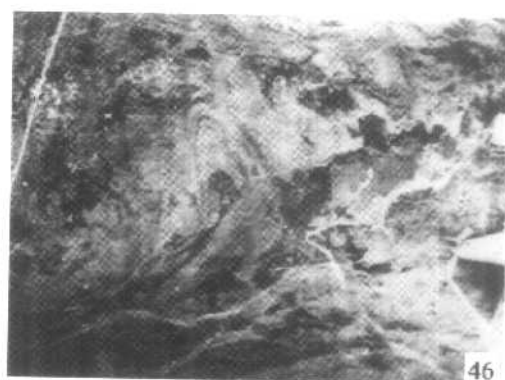
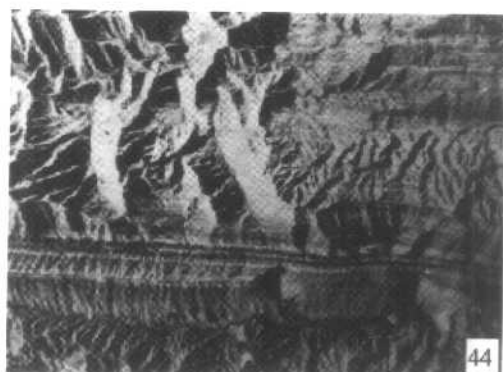
29



30

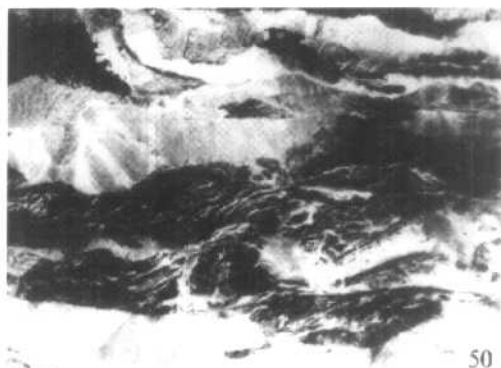




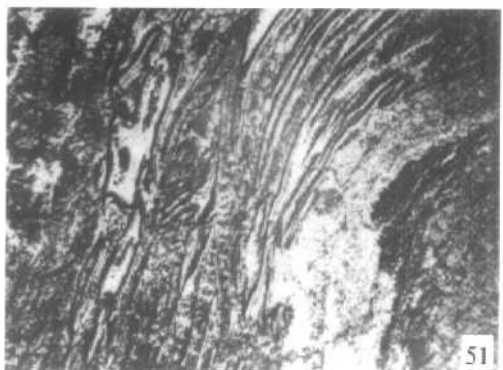




49



50



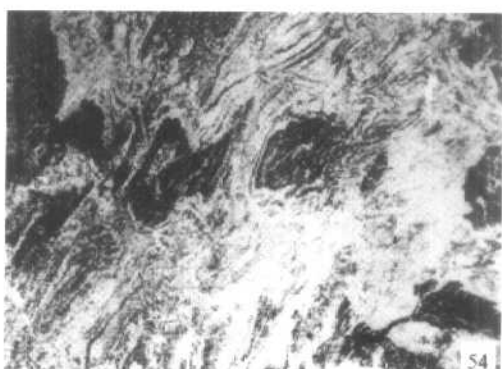
51



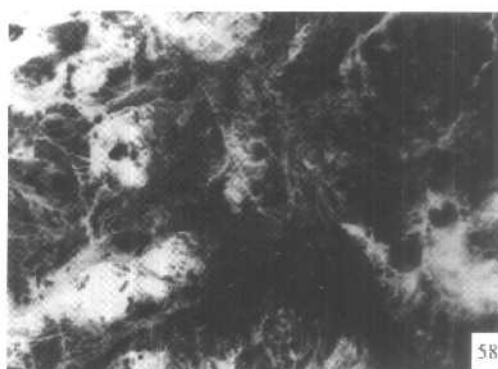
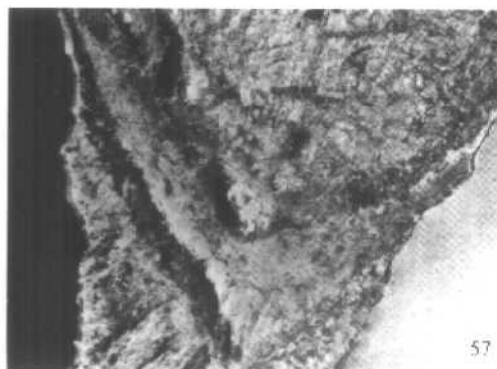
52

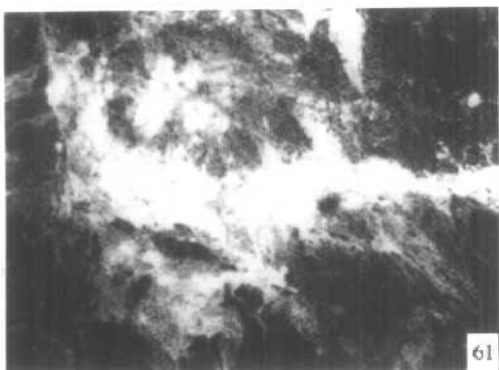


53

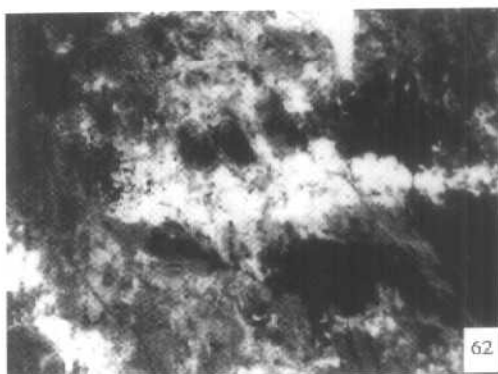


54

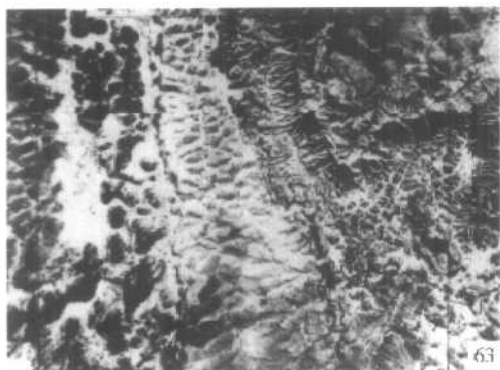




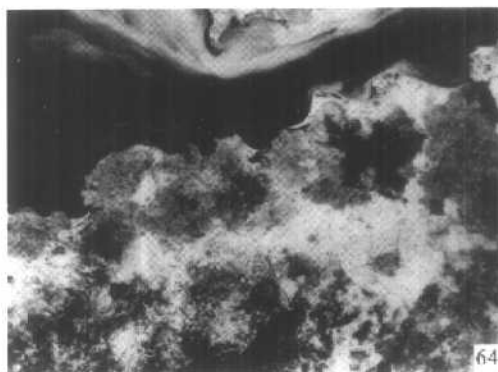
61



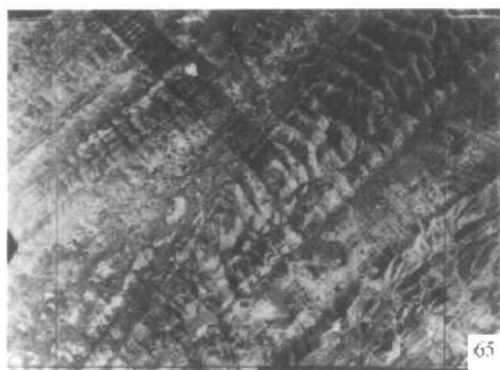
62



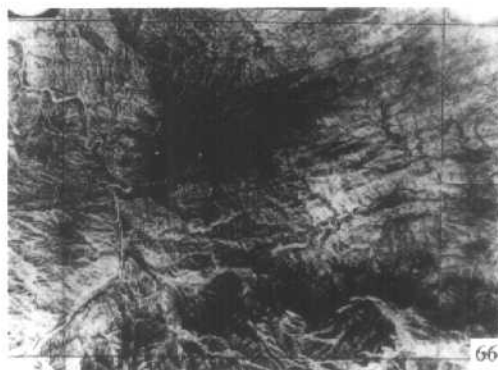
63



64



65



66



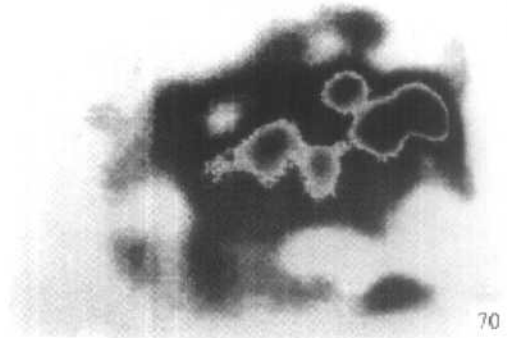
67



68



69



70



71



72



石油0114906